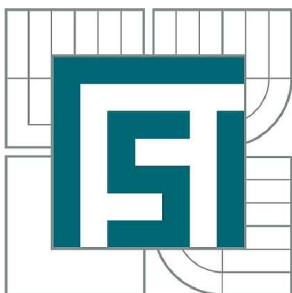


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

KRITERIA VZNIKU DEFEKTŮ PŘI OHYBU PROFILOVÝCH TRUBEK

CONDITIONS OF FAILURES GENERATION WHEN BENDING PROFILED TUBES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LUBOŠ FIŠAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RADKO SAMEK, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Luboš Fišar

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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 diplomové práce:

Kriteria vzniku defektů při ohybu profilových trubek

v anglickém jazyce:

Conditions of failures generation when bending profiled tubes

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úloha je konkretizována na ohyb trubek čtverhranného průřezu u kterých, v průběhu deformačního procesu, dochází k distorzi tvaru. Proces tvarových změn ovlivňují jak geometrické parametry dílce, tak i silový mechanismus procesu. Je třeba prozkoumat, které z činitelů procesu ohybu mají největší vliv na vznik nepřijatelných defektů.

Cíle diplomové práce:

Na základě experimentů ohybu trubek zjistit kritické procesní podmínky vzniku defektů. K určení průběhu deformačních změn příčného průřezu využít deformační síť. Definovat přípustné hodnoty distorze tvaru v návaznosti na geometrické parametry ohybu.

Seznam odborné literatury:

1. HOSFORD, William F.; CADDEL, Robert M. Metal Forming : Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York : Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.
2. ELFMARK, Jiří. Tváření kovů. Praha: SNTL, 1992. 520 s. ISBN 80-03-00651-1.
3. MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.L.; HU, S.J. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2.ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07506530000.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Radko Samek, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 23.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

FIŠAR Luboš: Kriteria vzniku defektu při ohybu profilových trubek.

V práci jsou popsány poznatky z technologie ohybu kruhových trubek, jde o popis konvenčních, ale i nekonvenčních zařízení. Jsou zde uvedeny technologické parametry v návaznosti na vznik defektů a výpočtové vztahy pro určení ohybového momentu. Tyto poznatky byly zobecněny a využity k řešení změny průřezu tvaru a tloušťek při ohybu trubek čtvercového průřezu. Řešení bylo provedeno na konkrétní součásti (ocelová trubka 20x2 mm s dvěma navazujícími poloměry R57,2 a R131,5). Z výsledků experimentů plyne, že daný materiál je téměř ideálně tuhoplastický, v nejvíce namáhaných místech má materiál dostatečnou zásobu tvařitelnosti. Měření tloušťek bylo využito pro přibližný výpočet změny polohy těžiště. To vykazuje posun 1,4 mm což je pro čistý ohyb zanedbatelná hodnota. V závěru jsou shrnuty nedostatky současné technologie výroby, kdy nevyhovující je především použitý trn, jeho poloha a mazání.

Klíčová slova: ohýbání trubek, čtvercová trubka, změna průřezu, metoda deformační sítě

ABSTRACT

FIŠAR Luboš: Conditions of failures generation when bending profiled tubes

The thesis describes the knowledge from a round tube bending technology, as a description of conventional and unconventional devices. There are technological parameters in relation to the creation of defects, and equations for determining the bending moment. These knowledge has been generalized and applied to solution the changes of cross-section shape and thickness in the bending of square cross-section. The solution was implemented to specific component (20x2 mm steel tube with two successive radii R57,2 and R131,5). The results of experiments shows that the material is almost rigid-perfectly plastic, in the most stressed areas has a sufficient supply of material formability. Thickness measurement was applied to calculate the approximate center of gravity changes. This shows a shift of 1.4 mm, which is negligible value for the pure bending. The end of the thesis summarizes the deficiencies of current manufacturing technology, which used mandrel is inadequate, wrong located and poor lubrication.

Keywords: tube bending, square tube, section distorsion, deformation grid

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FIŠAR, L. *Kriteria vzniku defektů při ohybu profilových trubek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 65 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Radko Samek, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Příbyslavi dne 25.5.2011

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji prof. Ing. Radko Samkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále pak společnosti Edscha Automotive Kamenice s.r.o. za technickou podporu, konkrétně pak Ing. Pavlu Vaňkovi.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1 Úvod	11
2 Technologie ohýbání	12
2.1 Ohýbání trubek	12
2.1.1 Ohyb nabalováním	13
2.1.2 Ohyb navíjením	14
2.1.3 Ohyb kombinovaný s osovou tlakovou silou	15
2.1.4 Ohyb zakružováním	15
2.1.5 Ohyb pomocí beranu	16
2.1.6 Další způsoby ohybu trubek	16
3 Parametry a defekty ohybu trubek	20
3.1 Technologické parametry	20
3.2 Defekty při ohybu trubek	22
3.2.1 Zploštění kruhového průřezu trubky	22
3.2.2 Zvlnění stěny trubky	22
3.2.3 Ztenčení stěny trubky	23
3.2.4 Odpružení při ohybu	24
3.3 Možnosti zabránění vzniku defektů	25
4 Rozložení napětí a ohybový moment	27
4.1 Rozložení napětí a deformace při ohybu	27
4.2. Výpočet ohybového momentu	27
4.2.1 Výpočet ohybového momentu trubky	29
4.3 Princip skladby ohybového momentu s přídatným napětím	29
5 Nástroje a nářadí pro ohýbání	31
5.1 Jednotlivé části nástroje	31
5.1.1 Matrice	31
5.1.2 Čelist	32
5.1.3 Přítlačná lišta	32
5.1.4 Vyhlažovač	33
5.1.5 Trny	34
5.2 Maziva	35
5.3 Defekty způsobené špatným nastavením nástrojů	36
6 Aplikace poznatků na ohyb trubek čtvercového průřezu	37
6.1 Parametry ohybu trubek čtvercového průřezu	37
6.2 Změna průřezu a související problémy	42
6.3 Napětí při ohybu a výpočet ohybového momentu	45
7 Konkrétní zkoumaná součást	48
7.1 Charakteristika zkoumané součásti	48

7.2 Výpočet technologických parametrů ohybu	50
7.3 Ohýbací zařízení a nástroje.....	50
7.4 Tahová zkouška a mechanické vlastnosti trubky.....	51
7.5 Materiálové modely a výpočet ohybového momentu.....	52
7.5.1 Materiálové modely a výpočet ohybového momentu pro R57,2.....	52
7.5.2 Materiálové modely a výpočet ohybového momentu pro R131,5.....	53
8 Vlastní experiment, měření a vyhodnocení	55
8.1 Metoda deformační sítě	55
8.2 Měření tloušťky stěn a posunutí těžiště průřezu	59
9 Technologické zhodnocení vyráběné součásti	63
10 Závěr	65

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

1 ÚVOD

Tato diplomová práce je spojena s řešením specifického výzkumu ÚST Standart BD 13001024 „Řešení problematiky tvarování dílců z trubek“ a probíhala ve spolupráci s firmou Edscha Automotive Kamenice s.r.o.

Tvarování dílců z trubek je velmi rozšířenou oblastí strojírenské výroby s neustále rostoucím počtem vyráběných dílců. Trubky lze tvarovat mnoha způsoby. Nosnou a zároveň nejpoužívanější technologií tvarování trubek je ohýbání, kterým se blíže zabývá tato práce. Aplikací využívající ohybu trubek je široké množství v mnoha odvětvích průmyslu, nejčastěji jsou trubky využívány jako nosiči média (voda, plyn, olej či vzduch). Dále se pak různé tvarované dílce využívají jako samostatné konstrukční prvky, které souvisí se současným trendem snižování hmotnosti dílců a v systémech tzv. lehčených konstrukcí, což je i případ zkoumané součásti. Z hlediska tvaru se nejčastěji jedná trubky kruhového průřezu, dále pak trubky čtvercové, které jsou realitou blíže zkoumané součásti.

Informací k ohybu trubek čtvercového průřezu, nebo obecně řečeno ohybu nekruhových průřezů, je v odborné literatuře velmi málo. Oslovené firmy, které se touto problematikou zabývají, tyto informace buď nemají a nebo je nechtějí poskytnout v rámci firemního tajemství. Z těchto důvodů bylo při studiu deformačních změn a definici parametrů ohybu čtvercových trubek nutné přihlédnout ke zkušenostem z ohybu trubek kruhového průřezu.

Součástí na kterou je konkretizováno zadání diplomové práce je vyráběna firmou Edscha Automotive s.r.o. a je součástí závěsu pátých dveří automobilu Škoda Superb 2. generace. V rámci analýzy procesu ohybu bylo nutno navštívit podnik, seznámit se s pracovním prostředím, zajistit potřebný materiál pro experimenty a zúčastnit se výroby dílce za pozornosti ze strany podniku.

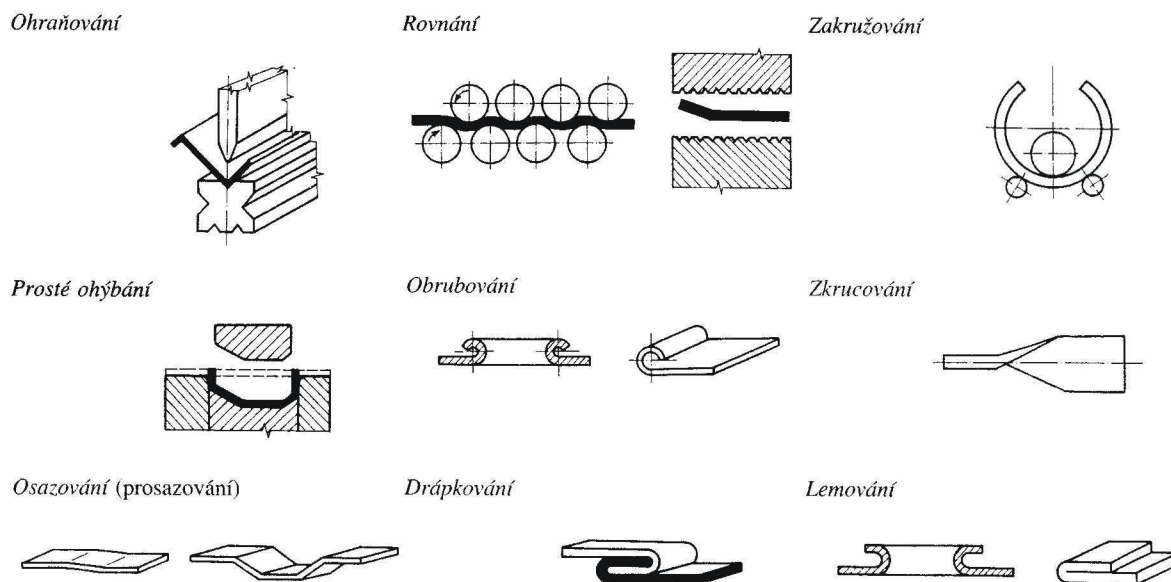


Obr. 1.1 Příklady součástí z trubek vyráběných pomocí ohybu [15]

2 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ [8], [14], [20], [23], [41]

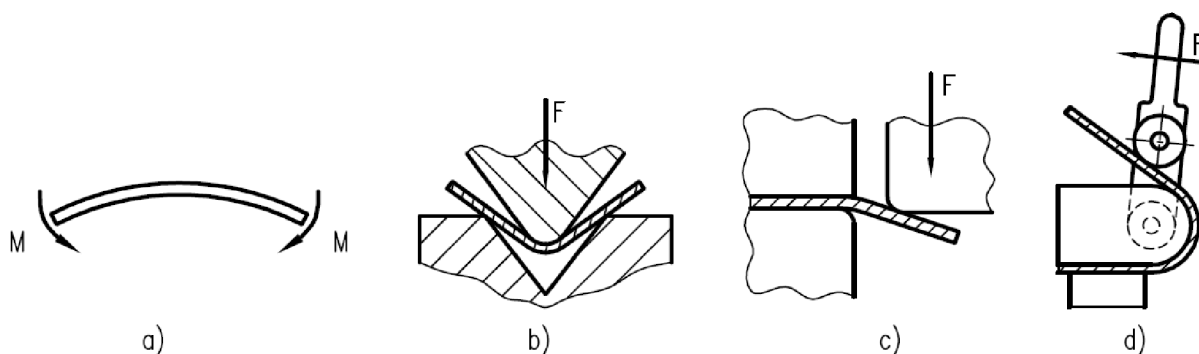
Ohýbání je metoda tváření kterou dosáhneme požadované změny tvaru polotovaru bez podstatné změny průřezu, z tohoto pohledu se tato technologie řadí do kategorie plošného tváření.

Technologie ohýbání je široce využívána a rozšířena ve strojírenské výrobě. Na obrázku 2.1 je několik základních operací dle ČSN 22 6001 využívající technologii ohýbání.



Obr. 2.1 Základní operace využívající ohýbání. [8]

Z hlediska aplikace vnějších sil potřebných k vyvolání ohybu rozlišujeme dva základní teoretické způsoby ohybu, a to ohyb pomocí vnějších momentů obr. 2.2a a ohyb lokální silou. Ohyb lokální silou se může uskutečnit ohybem v zápustce obr. 2.2b, ohybem přes hranu obr. 2.2c či pomocí nabalování obr. 2.2d.



Obr. 2.2 Schéma základních způsobů ohybu. [14], [23], [41]

Některé z výše citovaných operací se uplatňují při tvarování dílců z trubek, jsou to zejména operace prostého ohýbání a zakružování, dále pak nabalování, navíjení, vypínání, ohyb tlakovou silou a další metody uvedené v následující podkapitole.

2.1 OHÝBÁNÍ TRUBEK [31], [36], [49]

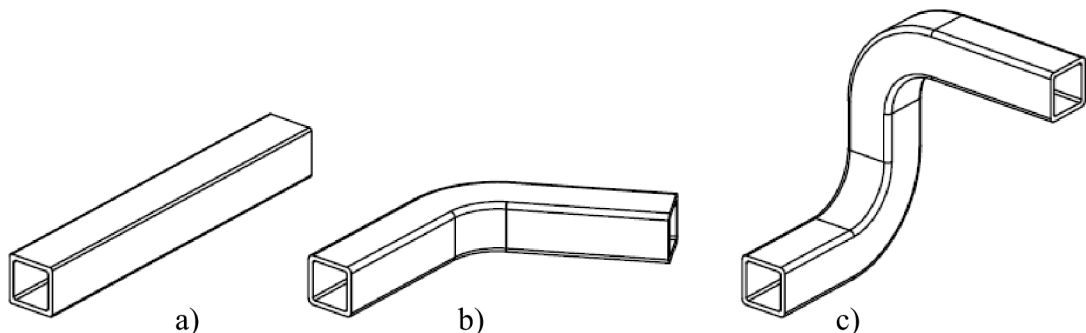
Trubky náleží do skupiny dílců profilových s uzavřenou dutinou. Jsou využívány ve stavebních aplikacích, dopravních systémech, transportní technice, energetickém průmyslu, potravinářském průmyslu, chemickém průmyslu, ve výrobě spotřebního zboží a mnoha dalších odvětví průmyslu nejčastěji jsou nosiči média jako je voda, plyn, olej nebo vzduch.

Dále se různě tvarované dílce z trubek využívají jako samostatné konstrukční prvky se širokou škálou uplatnění. Rozsah těchto použití narůstá se současným trendem uplatňování tzv. lehčených konstrukcí. Z tohoto širokého výčtu uplatnění pramení i velký rozsah rozměrů. Nejčastěji se jedná o trubky kruhového průřezu, dále potom čtyřhranné či vícehranné trubky. Terminologicky se vzhledem k rozměrům a značení jedná o trubky a trouby. Z tohoto pohledu se práce věnuje trubkám menších průměrů a tomu odpovídajícím tloušťkám stěn. Nicméně některé výrobní metody lze považovat za univerzální a jsou aplikovatelné pro trubky a trouby větších rozměrů.

Nejčastější a nosnou technologií tvarování trubek je ohýbání, symetrické či asymetrické vypínání, zkrucování nebo různé úpravy konců trubek jako je zplošťování, rozšiřování či zužování. Dílce mají často komplikované tvary, které získáváme kombinací několika metod.

Trubky se vyrábějí z hutnických polotovarů mnoha způsoby jako je válcování, tažení, vytlačování nebo svařování. Podle způsobu výroby je možné trubky rozdělit na bezešvé (hladké) a švové (svařované).

Z hlediska tvaru dílců představují velkou skupinu trubky přímé (obr. 2.3a), další skupinou jsou dílce s jedním či více poloměry ohybu v jedné rovině (obr. 2.3b) a do třetí skupiny patří dílce ohýbané ve více rovinách (obr. 2.3c).



Obr. 2.3 Základní tvary dílců z trubek

Základní rozdělení ohýbání:

1. Ruční
2. Strojní

Základní parametry pro správnou volbu zařízení jsou zejména technologické parametry vyráběného kusu, ohýbaný materiál a počet vyráběných kusů. Ruční ohyb je omezen především potřebným ohybovým momentem, který je schopna obsluha vyvinout pomocí obslužné páky. Například dle [36] je ručně možné ohýbat trubky až do průměru 40 mm a tloušťky 1,65 mm s poznámkou, že proces je pomalý a opakovatelnost není zaručená.

Dále lze ohyb trubek rozdělit na ohyb:

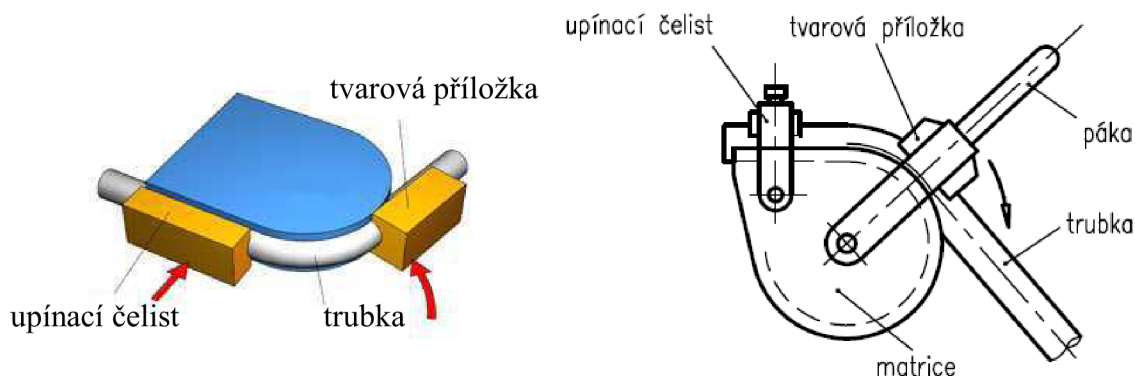
1. Za studena
2. S ohřevem

Při ohybu trubek převažuje ohyb za studena, ohyb s ohřevem se používá ve výjimečných případech, například pokud se jedná o ohyb, kdy je poloměr ohybu menší než minimální doporučený. Ohřevu využívají také některé samostatné technologie uvedené dále v této kapitole.

2.1.1 Ohyb nabalováním [4], [6], [36], [49]

Z technického hlediska se jedná o velice jednoduchou metodu, která se nejčastěji uplatňuje při ručním ohýbání pomocí přípravku, nicméně princip je užíván i u strojních zařízení. Konec ohýbaného dílce je pevně upnut k nepohyblivé matici a pohyblivá část

(kladka, výkyvná tvarová příložka) nabaluje profil podél matrice. Princip zařízení či přípravku je znázorněn na obr. 2.4



Obr. 2.4 Schéma ohybu nabalováním [4], [49]

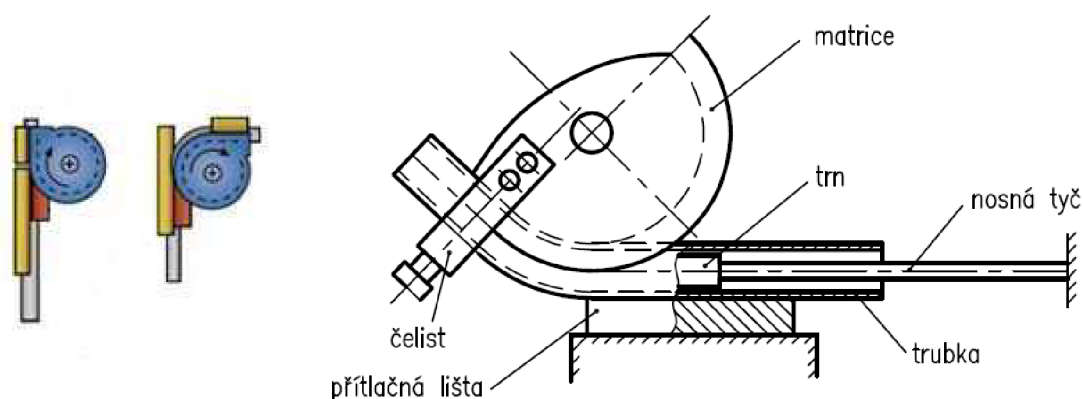
Ohýbaný dílec je přitlačován na nepohyblivou matrici a proto ohyb pomocí nabalování nevyžaduje takovou upínací sílu, jako v případě ohybu navíjením. Mechanické trny nemohou být použity jelikož trn by se musel pohybovat s tvářeným dílcem, který je nabalován na matrici. V případě potřeby je nutné použít jiné výplně (např. kapalinu).

Standardní poloměr ohybu je dle [6], [36] asi 4x průměr trubky a součásti mohou být ohýbány až do 170°. U ohybu nabalováním je menší tahové napětí na vnějším povrchu než při navíjení, neutrální osa leží ve vnější třetině profilu. Toto rozložení napětí je vhodné při ohýbání povrchově upravených trubek.

Celkově však nemá ohyb nabalováním takovou kontrolu toku materiálu jako ohyb navíjením.

2.1.2 Ohyb navíjením [4], [6], [36], [49]

Způsob ohybu pomocí navíjení je realizován rotující (pohyblivou) matricí, na které je připevněna trubka pomocí upínací čelisti dostatečným tlakem k navinutí trubky. Schéma je na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Schéma ohybu navíjením [4], [49]

Zploštění trubky je při navíjení větší než při nabalování, proto mnoho zařízení používá pro navíjení trubek pevné trny. Tato metoda je vhodná pro tenkostěnné trubky obzvláště pro malé poloměry ohybu. Přítlačná lišta může být pevná a nebo pohyblivá. Pevná přítlačná lišta musí odolat otěru způsobeném smýkáním ohýbané trubky po povrchu lišty na rozdíl od pohyblivé přítlačné lišty, která je díky pohybu s ohýbající se trubkou méně náchylná k tomuto otěru a poskytuje tak lepší vedení a kontrolu polotovaru. Jednotlivé části zařízení jsou podrobněji popsány v kapitole 5.

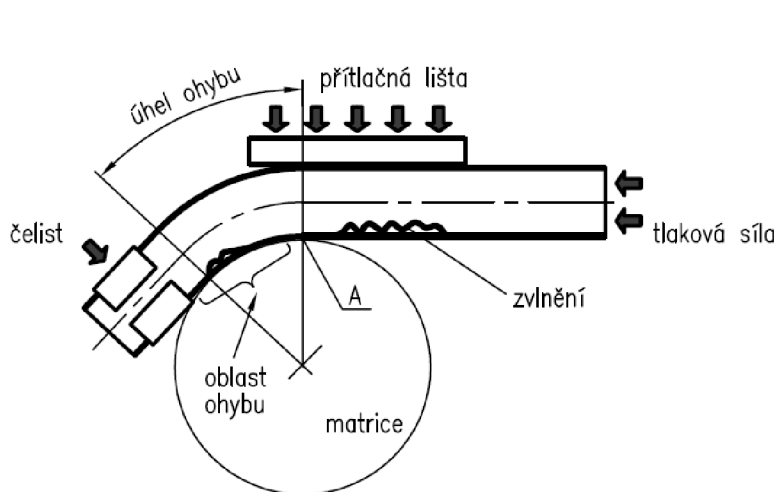
Navíjení je široce rozšířená, velice univerzální metoda ohýbání trubek malých poloměrů s lepší rozměrovou kontrolou než ostatní metody ohýbání. Dle [6], [36] lze ohýbat dílce až do 180° s průměry trubek od cca 12 do 250 mm a poloměru ohybu blízcího se průměru trubky. To ovšem vyžaduje potřebné vybavení jako jsou vnitřní trny nebo vyhlazovače.

Tato metoda je rozšířenější pro strojní ohýbačky než ohýbání pomocí nabalování. Navíjet je možno pomocí ruční nebo strojní realizace otáčení matrice.

2.1.3 Ohyb kombinovaný s osovou tlakovou silou [6], [21], [30], [36], [49]

Při ohybu trubek na velmi ostrý poloměr ohybu dochází k značnému ztenčení stěny trubky na vnějším poloměru. Tento nepříznivý jev může zapříčinit vznik trhliny již v průběhu ohýbání.

Proces ztenčení může omezit nebo kompenzovat ohyb za současného tlaku, který lze uskutečnit s ohřevem i bez ohřevu. Přidaná tlaková síla má snižuje ztenčení stěny ovšem na druhou stranu může podnítit ztrátu stability vnitřní stěny trubky s následným zvlněním před místem ohybu A, situaci znázorňuje obr. 2.6. Velikost tlakové síly je tedy limitována tímto defektem.



Obr. 2.6 Zvlnění před místem ohybu [30]



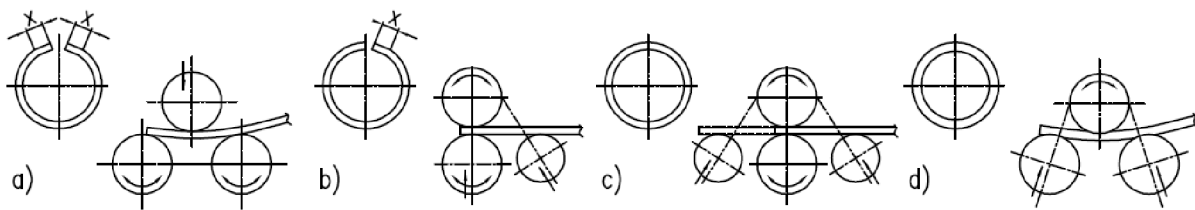
Obr. 2.7 Zakružování šroubovice [7]

2.1.4 Ohyb zakružováním [1], [6], [7], [36]

Ohyb pomocí zakružování je vytvářen postupným průchodem trubky mezi tvarovanými kladkami, čímž dojde v důsledku postupného ohybu k zakroužení dílce. Pro ohyb se nejčastěji využívá tři válců ať už symetricky či nesymetricky uložených, vybrané schémata základních zařízení pro zakružování jsou na obr. 2.8.

Dle [5], [13] je možné ohýbat trubky až do průměru 200mm, minimální rádius je 4x průměr trubky, ale doporučovány jsou hodnoty 6x a více.

Zakružování se využívá pro tvarování trubek do prstenců a s přidavnými zařízeními do kontinuálních šroubovic, obr. 2.7. Nevýhodou je obtížná kontrola odpružení, pomalejší proces než u ostatních metod. Další nevýhodou jsou nezakroužené úseky prstenců zejména u symetrických zakružovaček, viz. vzdálenosti x na obr. 2.8. Tyto konce musí být před-ohnuty nebo popřípadě odstraněny.



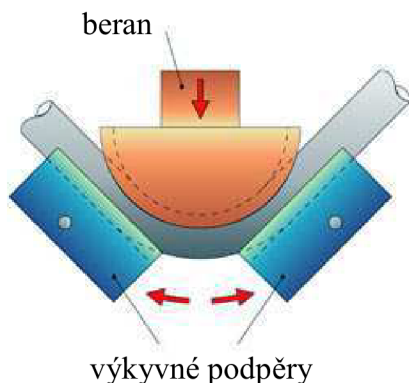
Obr. 2.8 Základní principy zakružování plechů a trubek [1]

2.1.5 Ohyb pomocí beranu [4], [6], [32], [36]

Ohýbaný dílec je umístěn mezi dvě podpěry (matrice) a na trubku působí ohybník. Podpěry se mohou otáčet při vertikálním posunu ohybníku dopředu, a udržovat tak podporu dílu, mohou být však i pevné. Schéma zařízení je na obr. 2.9. Metoda je velice jednoduchá, rychlá, ale poskytuje malou kontrolu nad procesem. Používá se na dílce jejichž velikost je závislá na dostupném ohýbacím tlaku. Pro nenáročné aplikace postačuje tlak vyvinutý obsluhou, obr. 2.10. Pro náročnější aplikace se nejčastěji využívá hydraulického pohonu, resp. Beranu lisu.

Dostupná zařízení umožňují ohýbat trubky dle [6], [36] do 165° o průměrů až 350 mm, je ovšem nutné počítat s distorzí tvaru. Minimální poloměr ohybu je 3x průměr trubky, ale 4 – 6x je vhodnější.

Metoda je vhodná pro dílce, u kterých je vzhledem k funkčnosti přípustná určitá změna tvaru průřezu. A lze tak velice rychle a efektivně provádět ohyby s velmi vysokou produkcí.



Obr. 2.9 Schéma ohybu beranem [4]

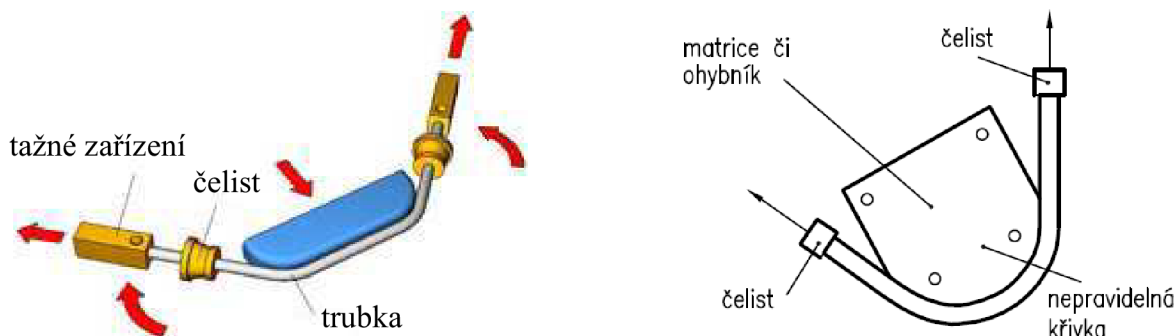


Obr. 2.10 Ruční ohýbačka [32]

2.1.6 Další způsoby ohybu trubek

Ohyb pomocí vypínání [4], [6], [34], [36]

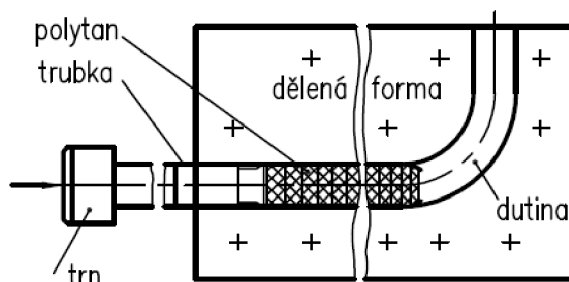
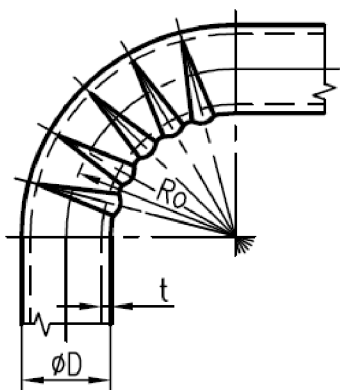
Na obr. 2.11 je zobrazen princip metody vypínání, kdy je polotovar ohýbán (přetažen) přes tažník s přidavným tahovým napětím. Přidavné tahové napětí způsobí, že průřez je namáhán tahem v celém průřezu což má velmi příznivý vliv na odpružení. Tloušťka stěny se tak snižuje, ale v podstatě stejnoměrně na obou stranách. Tato metoda je vhodná pro ohýbání dílců s nepravidelnou křivostí či velkých poloměrů s malým zakřivením. Vypínáním lze dosáhnout požadovaného tvaru na jedinou operaci například oproti zakružování. V takovém případě dojde k úsporám práce a času i přes to, že proces vypínání je pomalý. Nevýhodou je, že zařízení a nástroje jsou obvykle dražší. Vypínání je vhodné i pro ohyb nekruhových profilů a v případě potřeby je možné použít výplň.



Obr. 2.11 Schéma ohybu pomocí vypínání [4], [36]

Ohyb záhybový [6], [13], [36]

Záhyby jsou tvořeny na jedné straně trubky ohřevem, nejčastěji plynovým hořákem a tlakovou silou na trubku. Vytvořené zvlnění zkracuje stranu, z které se stává vnitřní strana a dochází tak k ohybu. Schéma ohnuté součásti je na obr. 2.12. Metoda je používána v terénu, kde není dostupné potřebné zařízení a je aplikována na tlustostěnné velké ocelové trubky až do průměrů 650mm s poloměry ohybu od 2x průměr trubky, dle [6], [36].



Obr. 2.12 Schéma ohybu pomocí záhybu [13] Obr. 2.13 Ohyb silou s pružnou výplní [49]

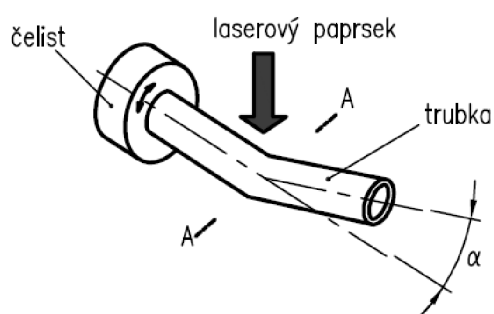
Ohyb tlakovou silou s pružnou výplní [47], [48], [49]

Princip je uveden na obr. 2.13, konec trubky je zúžený, trn působí na pružnou výplň trubky, která se rozpěchuje a v důsledku třecích sil je trubka vedena dělenou zápustkou pomocí výplně. Dochází k napěchování stěny trubky, čímž je kompenzováno ztenčování. Zvlnění na vnitřním poloměru ohybu a změna průřezu jsou potlačeny vysokým tlakem výplně. Metoda je dle [47] vhodná pro krátké tenkostěnné trubky ohýbané na velmi ostrý poloměr ohybu (1-2)x průměr trubky. Úhly ohybu se pohybují od 15° do 120°. Určující parametry pro úspěšný ohyb jsou především vnitřní tlak, třecí podmínky povrchu trubky a zápustky, rychlost ohybu.

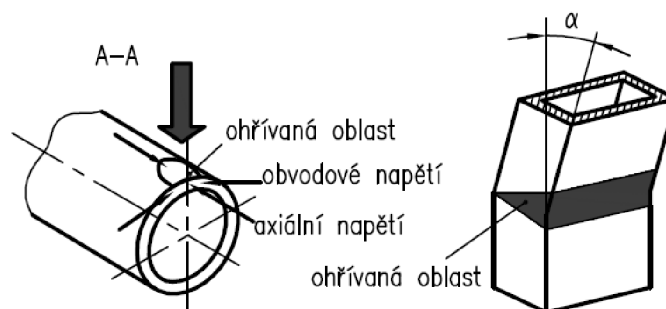
Ohyb pomocí Laserového paprsku [22], [45]

Jedná se o jednu z metod, kdy tváříme pomocí lokální plastické deformace v tlaku bez vnější síly. Princip znázorněný na obr. 2.14 spočívá ve využití laserového paprsku pro lokální ohřev materiálu, trubka se obvykle otáčí a na vnější straně je ohřívána. Trubka podléhá plastické tlakové deformaci a zesílení stěny v důsledku omezení tepelné roztažnosti vlivem okolního materiálu, následné zkrácení tepelně ovlivněné oblasti způsobí ohyb. V případě nerotačních součástí je nutné ohřát určitou oblast, pro vytvoření ohybu. Například u obdélníkového průřezu má oblast tvar klínu, viz. obr. 2.15. Požadovaného tvaru se dosáhne postupným ohříváním a ochlazováním součástí. Proces je velmi pomalý, ale lze jím ohýbat

nejrůznější tvary a polotovary, lze vytvářet i trojrozměrné ohyby. Vzhledem k principu a časové náročnosti metody je vhodná pro kusovou výrobu nebo jako velmi dobrý nástroj pro rapid prototyping.



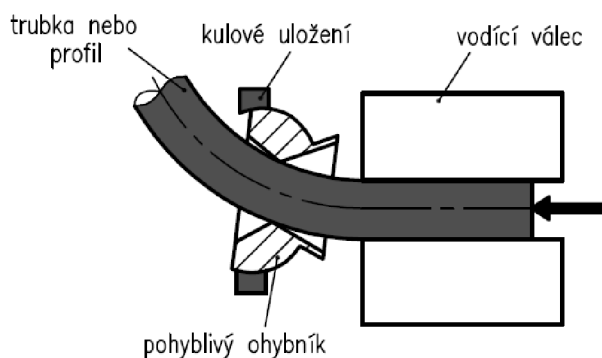
Obr.2.14 Schéma ohybu pomocí laseru [22]



Obr. 2.15 Ohyb obdélníkového průřezu[45]

Flexibilní ohýbání – MOS [16], [17], [45]

Jedná se o nový patentovaný způsob ohybu, který spočívá v posunu trubky ve válci a její tvarování pomocí pohyblivého ohybníku. Poloměr a úhel ohybu je řízen vzdáleností a nakloněním pohyblivého ohybníku od pevného válce. Schéma zařízení je na obr. 2.16, zařízení s ohýbaným dílcem pak na obr. 2.17. Tento princip umožňuje poměrně jednoduše provádět složité prostorové ohyby pouhým posunutím nebo natočením ohybníku bez přímých částí mezi jednotlivými ohyby. Lze tedy vytvářet ohyby, které jsou pro konvenční stroje obtížně proveditelné, nebo časově poměrně náročné. Nevýhodou je, že pro každý průřez je nutný samostatný ohybník. Metoda je vhodná nejen pro trubky kruhového průřezu, ale pro profily nejrůznějších tvarů. Uplatnění nachází například v automobilovém, nábytkářském či designovém odvětví průmyslu.



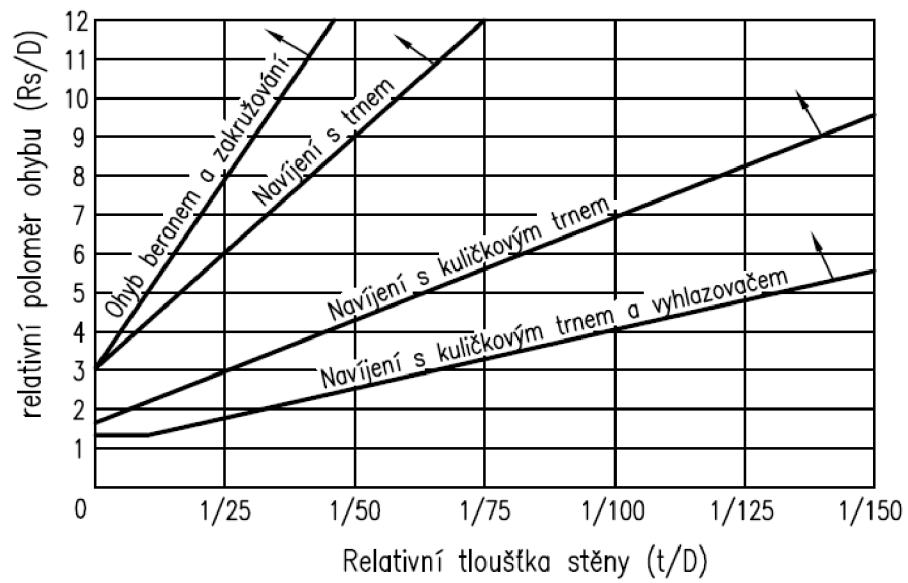
Obr. 2.16 Schéma zařízení MOS [45]



Obr. 2.17 Zařízení při ohybu trubky [17]

Volba metody vzhledem k parametrům ohybu dle [28]

Jak již bylo uvedeno správná volba zařízení je podmíněna především parametry samotného vyráběného kusu. Z pohledu zařízení je volba omezena vlastními rozsahy parametrů jednotlivých zařízení, jak je uvedeno u jednotlivých základních metod ohybu. Celkový přehled volby metody dle technologických parametrů znázorňuje obr. 2.18.

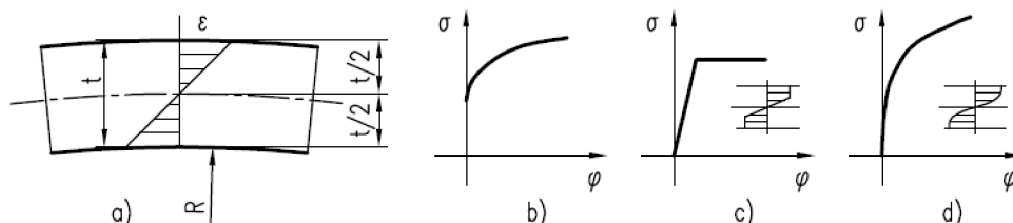


Obr. 2.18 Volba metody ohybu dle technologických parametrů ohybu, dle [28]

3 PARAMETRY A DEFEKTY OHYBU TRUBEK [13], [23], [31], [35]

Při analýze napětově-deformačního stavu při ohybu trubek se vychází z poznatků známých z ohybu plechů. Jde především o:

- schéma rozložení deformace, obr. 3.1a
- zohlednění materiálového modelu, obr. 3.1b,c,d
- aproximaci průběhu ohybového napětí, obr. 3.1c,d



Obr. 3.1 Rozložení deformace a materiálové modely při ohybu plechu [23]

Ve zjednodušeném případě ohybu trubek se uvažuje, že osa nulového přetvoření resp. napětí nemění při ohybu svou polohu a neuvažuje se ani změna tloušťky stěny trubky. Za těchto okolností je přetvoření na středním poloměru R_s rovno nule ($\varepsilon = 0$), jak ukazuje obr. 3.2.

3.1 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY [13], [31], [35], [36]

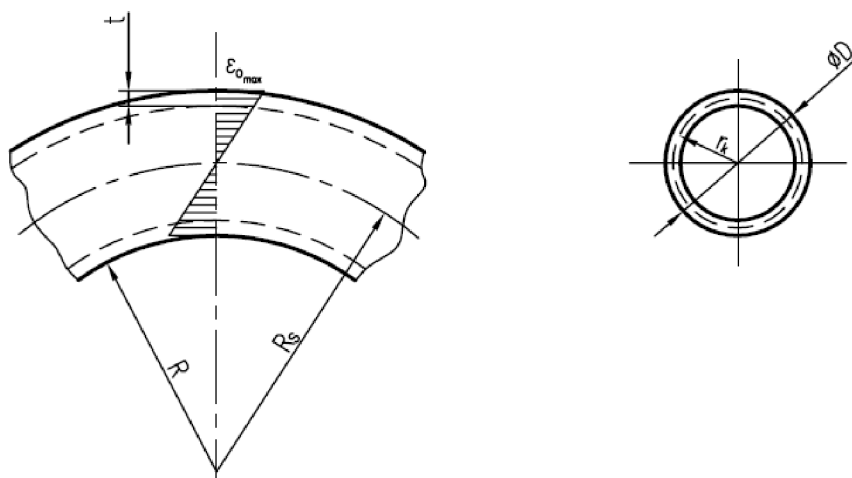
Ohyb trubek je specifický nejen tím, že jde o ohyb dutého profilu, který na rozdíl od plných tyčí nemá jádro, tudíž přesun materiálu při ohybu je pouze po stěnách trubky, ale také proto, že se v převážné míře jedná o trubky tenkostěnné.

Hlavní technologické parametry uvádí obr. 3.2, jedná se o:

— relativní tloušťku stěny $\frac{t}{D}$ (1)

— relativní poloměr ohybu $\frac{R_s}{D}$ (2)

kde: t – tloušťka stěny trubky
 D – vnější průměr trubky
 R_s – střední poloměr ohybu



Obr. 3.2 Geometrické parametry trubky [49]

Hodnota relativní tloušťky stěny (t/D) je kritérium tenkostěnnosti trubky. Je-li $\frac{t}{D} \geq \left(\frac{1}{25} \approx \frac{1}{30}\right)$ je trubka považována za tenkostěnnou. Z hlediska obtížnosti ohybu jsou posuzovány oba technologické parametry t/D , R_s/D společně.

Ohyb kruhových trubek lze za studena bez užití stabilizačních výplní provést dle [13], [49] za podmínek

$$\frac{t}{D} \geq \frac{1}{10}, \left(\frac{1}{15}\right); \quad \frac{R_s}{D} \geq 3, \quad \text{v závislosti na materiálu trubky}$$

Při použití stabilizačního trnu je dle [13] možné dosáhnout přijatelné geometrie při:

$$\frac{t}{D} = \frac{1}{20}; \quad \frac{R_s}{D} = 2,5$$

Minimální poloměry ohybu bez stabilizačního trnu udává Tabulka 1, průměrné poloměry ohybu tenkostěnných trubek s použitím trnu a vyhlazovače pak Tabulka 2.

Tabulka 1 Minimální poloměry ohybu pro ocelové trubky bez výplně. [36]

Vnější průměr trubky	Minimální střední poloměr ohybu pro tloušťku stěny:					
	0,89	1,24	1,65	2,11	2,36	3,05
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
4,8	7,9	6,4	4,8	-	-	-
6,4	13	9,5	7,9	-	-	-
7,9	22	19	16	-	-	-
9,5	38	32	29	25	-	-
13	57	50	44	38	-	-
19	102	75	64	50	-	-
25	203	152	102	75	50	50
38	-	-	305	254	203	152
50	-	-	-	610	508	406
64	-	-	-	-	610	508
75	-	-	-	-	-	635

Tabulka 2 Průměrné poloměry ohybu pro tenkostěnné ocelové trubky [36]

Vnější průměr trubky	Průměrný střední poloměr ohybu pro tloušťku stěny:					
	0,89	1,24	1,65	2,11	2,36	3,05
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
13	13*	13*	-	-	-	-
16	16*	16*	-	-	-	-
19	19	19*	19*	-	-	-
22	32	29	25*	-	-	-
25	44	38	32	29*	-	-
29	64	50	44	38	-	-
32	98	89	75	64	50	-
38	127	108	95	83	70	57
50	229	203	178	152	127	89
64	305	267	235	203	165	127
75	381	330	279	254	229	203

* vyhlazovač není nutný

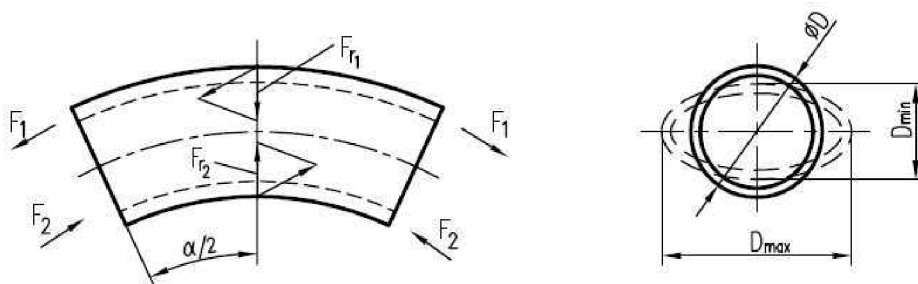
3.2 DEFEKTY PŘI OHYBU TRUBEK [13], [31], [35], [36]

Pokud nedojde k dodržení doporučených technologických parametrů $\frac{t}{D}$, $\frac{R_s}{D}$ mohou vznikat nepřipustné defekty:

- zploštění kruhového průřezu
- zvlnění stěny trubky na vnitřním poloměru ohybu
- ztenčení stěny trubky na vnějším poloměru ohybu
- odpružení při ohybu

Ztenčení a odpružení je dáno podmínkami procesu ohybu, stejnými jako u ohybu plechů. Pro trubku jsou specifické první dva uvedené defekty.

3.2.1 Zploštění kruhového průřezu trubky [10], [11], [31], [35], [36]



Obr.3.3 Zploštění průřezu trubky [35]

Vznik zploštění či ovality průřezu lze vysvětlit na základě rozložení vnitřních sil v prostoru ohybu. V důsledku působení vnějšího ohybového momentu vznikají v průřezu tlaková a tahová napětí, působící podél křivky ohybu. Rozložení napětí je znázorněno na obr. 3.3. Těmito napětím odpovídají vnitřní tahové a tlakové síly z jejichž rozkladu plynou radiální síly, které vyvolávají zploštění průřezu, viz. obr. 3.3.

Zploštění je možné sledovat pomocí koeficientu ovality, který je definován jako:

$$K_o = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

kde: D_{\max} , D_{\min} , D jsou jednotlivé hodnoty průměrů dle obrázku 3.3

Jedná se o smluvní vyjádření dle technických předpisů. Například pro ohyby trubek používaných v leteckých motorech je dle ČSN EN 3658, [11] přípustná ovalita max. 10%. Pozn. ČSN EN 13 480-4, [10] udává pro trubky zatěžované vnitřním tlakem jiný parametr tzv. nekrühovitost definovanou jako:

$$u = \frac{2 \cdot (D_{\max} - D_{\min})}{D_{\max} + D_{\min}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4)$$

3.2.2 Zvlnění stěny trubky [10], [28], [49]

Jedná se ztrátu stability poměrně tenké stěny v oblasti vnitřního poloměru vlivem tlakového napětí. U nežádoucího zvlnění se vyhodnocuje rozteč a výška vln, kdy například dle ČSN EN 13 480-4, [10] se musí splnit obě následující podmínky:

$$\text{a) } h_m \leq 0,03 \cdot d_{01} \quad (5)$$

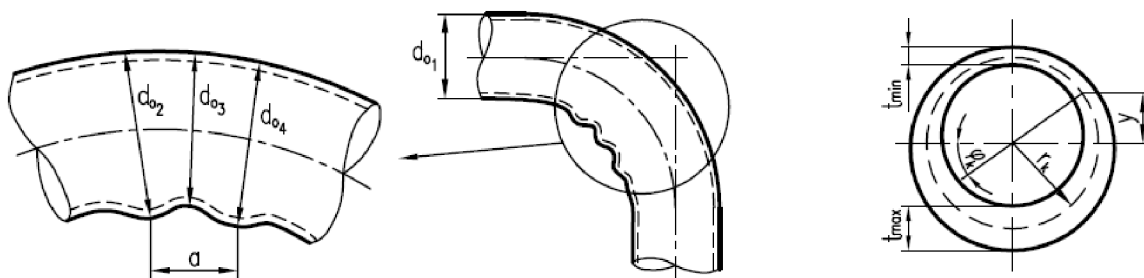
kde: h_m – je střední výška sousedních vln, vypočtená následovně:

$$h_m = \frac{d_{02} + d_{04} - d_{03}}{2} \quad (6)$$

kde: $d_{01}, d_{02}, d_{03}, d_{04}$ – jsou jednotlivé průměry dle obr. 3.4

$$b) a \leq 12 \cdot h_m \quad (7)$$

kde: a – je vzdálenost vln



Obr. 3.4 Znáornění geometrie zvlněné trubky [10] Obr. 3.5 Změna průřezu trubky [35]

3.2.3 Ztenčení stěny trubky [10], [11], [13], [31], [34], [36]

Ke ztenčení stěny trubky dochází vlivem tahového napětí v oblasti vnějšího poloměru ohybu. Naopak na vnitřní straně poloměru ohybu dochází vlivem tlakového napětí k zesílení stěny trubky. Tyto změny průřezu jsou schématicky zobrazeny na obrázku 3.5. Na ztenčení stěny trubky se největší mírou podílí parametr R/D , vliv t/D na ztenčení je zanedbatelný. Použití tuhých, sypkých nebo kapalinových výplní má na ztenčení rovněž zanedbatelný vliv. Při použití mechanických trnů může naopak při jeho nesprávném umístění či volbě dojít k intenzivnějšímu procesu ztenčování. Dle ČSN EN 13 480-4, [10] nesmí minimální tloušťka klesnout pod hodnotu, kterou požaduje výpočet. Například pro trubky leteckých motorů dle ČSN EN 3658, [11] je přijatelná hodnota ztenčení max. 10%. Pro přesnější výpočet můžeme t_{\min} určit takto:

Osové přetvoření je definováno jako:

$$\varepsilon_o = \frac{y}{R_s} \quad (8)$$

kde: y – vzdálenost bodu na střední kružnici, viz. obr 3.5

R_s – střední poloměr ohybu

Zároveň zanedbáváme změnu kruhovitosti trubky (oválnosti) a uvažujeme dvojosé přetvoření, tedy tangenciální přetvoření rovno nule:

$$\varepsilon_t = 0 \quad (9)$$

Za těchto okolností plyne ze zákona zachování objemu:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_o \quad (10)$$

Maximální hodnota osového přetvoření je dle vztahu (8) dána:

$$\varepsilon_{o, \max} = \frac{r}{R_o} = \frac{d}{2} \cdot \frac{1}{R_s} = \frac{D-t}{2 \cdot R_s} \quad (11)$$

Radiální přetvoření ve směru tloušťky:

$$\varepsilon_{r_{\max}} = \frac{t - t_{\min}}{t} = 1 - \frac{t_{\min}}{t} \quad (12)$$

Dosažením rovnic (11) a (12) do vztahu (10) obdržíme:

$$t_{\min} \cong t \cdot \left(1 - \frac{D - t}{2 \cdot R_s} \right) \quad (13)$$

Z tohoto vztahu je patrné, že se snižováním poloměru ohybu, případně s nárůstem průměru trubky narůstá ztenčování stěny.

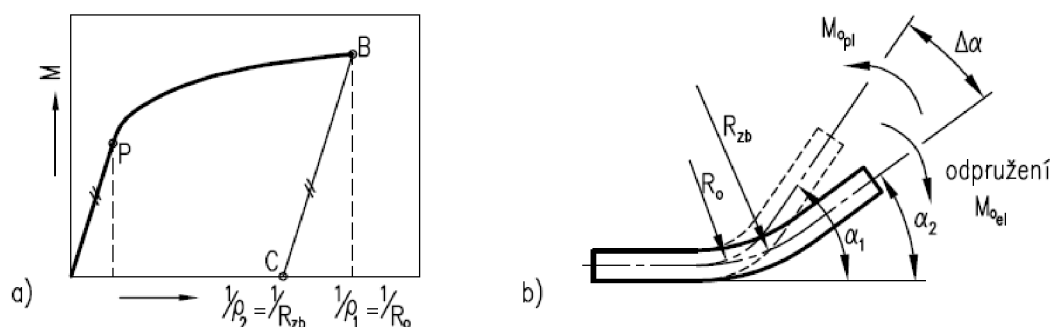
Ztenčení stěny dílce snižuje jeho únosnost a způsobuje nerovnoměrné rozložení zatěžujícího napětí, což může způsobit koncentraci napětí a vznik mikrotrhlin. Ztenčení ovšem nelze příliš snadno potlačit na přijatelnou hodnotu, v úvahu připadá například ohyb s tlakovou silou.

V zahraniční literatuře se někdy podobně jako koeficient ovality K_o , objevuje koeficient ztenčení stěny definován jako:

$$K_z = \frac{t - t_{\min}}{t} \cdot 100 [\%] \quad (14)$$

3.2.4 Odpružení při ohybu [14], [23], [35], [49]

Za jeden z defektů je také možno považovat změnu poloměru resp. úhlu ohybu trubky v důsledku odpružování. Odpružení nastává po ukončení ohybu a odtížení vlivem pružných deformací, které jsou vratné. V jeho důsledku nesouhlasí tvar nástroje a výsledný tvar dílce. Při konstrukci nástroje je třeba brát zřetel na odpružení a nástroj konstruovat tak, aby umožňoval ohyb ostřejší, čímž se kompenzuje odpružení. Schéma odpružení po ohybu je na obrázku 3.6.



Obr. 3.6 Odpružení při ohybu [14], [23]

Vztah dle [14], [49] pro výpočet zbytkového poloměru udává (15), tento poloměr by měl odpovídat jmenovitému – výkresovému poloměru.

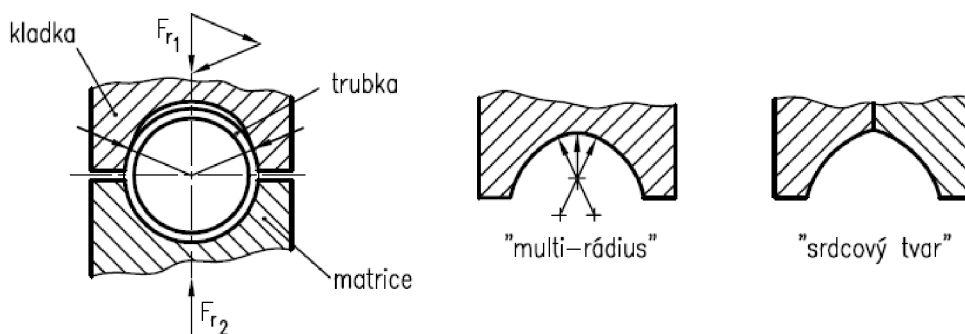
$$R_{zb} = \frac{R_0}{1 - \frac{M_{Oel} \cdot R_0}{E \cdot I}} \quad (15)$$

kde: R_0 – poloměr ohybu dílce při zatížení ohybovým momentem
 R_{zb} – poloměr ohybu dílce po odlehčení
 M_{Oel} – obecný elastický ohybový moment
 I – kvadratický moment průřezu
 E – modul pružnosti v tahu

Celkově lze konstatovat, že zbytková křivost, čili odpružení narůstá úměrně s růstem ohybového momentu, růstem poloměru ohybu a růstem úhlu ohybu. Naopak zvýšením ohybové tuhosti trubky, tedy parametr $E \cdot I$ vede ke snížení odpružení.

3.3 MOŽNOSTI ZABRÁNĚNÍ VZNIKU DEFECTŮ [35], [36], [42], [45], [49]

Zplošťování průřezu a zvlnění vnitřní stěny je do určité míry možné potlačit použitím vhodných výplní. Další možnosti je úprava profilu drážky nástroje zobrazená na obrázku 3.7.



Obr. 3.7 Úpravy drážky nástroje [35], [42]

plnicí materiál				trny		
tekutiny	písek	polymery	nízkoaluminové kovy	jednoduché trny	kuličkové trny	vrstvené trny

Obr. 3.8 Vnitřní výplně pro snížení defektů při ohybu trubek. [45]

Na obr. 3.8 je přehled možných výplní. Vnitřní podpory je možné rozdělit na trny a plnicí materiál.

Trny jsou používány nejčastěji na strojních zařízeních při sériové výrobě a lze je dále dělit podle toho jestli jsou nebo nejsou ohnuty během ohybu.

- Vrstvené trny – jedná se tenké nejčastěji ocelové plechy navrstvené na sebe umožňující tak jejich ohyb spolu s trubkou, poměrně efektivně zabraňují změnám průřezu a jsou vhodné pro ohyb čtvercových či obdélníkových trubek.
- Kuličkové trny – zabraňují velice efektivně změně průřezu, ale důležitá je jejich správná volba.
- Jednoduché trny – postačují při určitých podmínkách ohybu, mohou či nemusejí být formovány. Jejich velkou výhodou je jednoduchost.

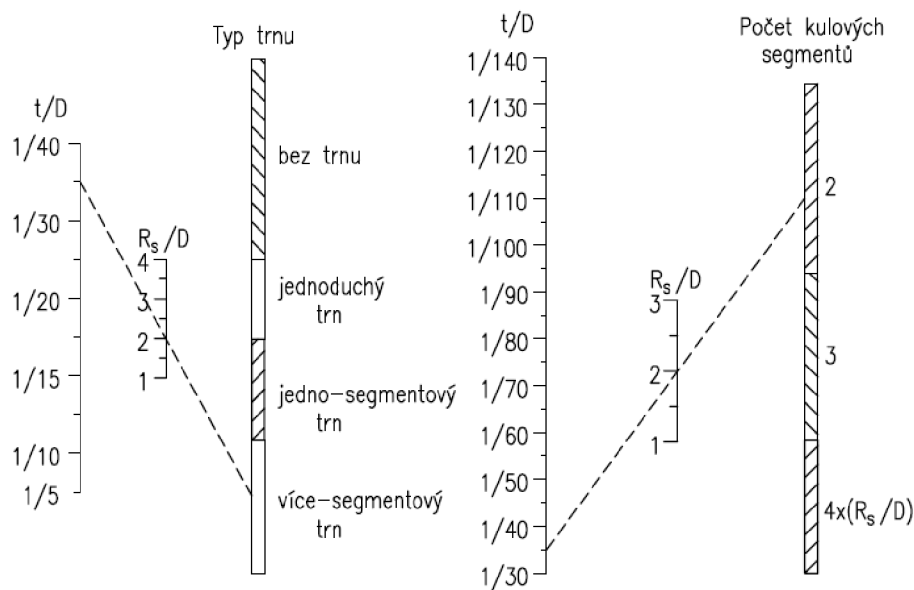
Podrobněji jsou tyto trny popsány v podkapitole 5.1.5.

Druhou skupinou jsou výplně ve formě plnicího materiálu, jedná o nejjednodušší metodu k zabránění distorze tvaru, ovšem vzhledem k vysokému podílu ruční práce a tedy i časové náročnosti nejsou vhodné pro sériovou výrobu.

- Nízko-tavitelné kovy – dávají dobrou podporu, ale distorzi se nelze plně vyhnout (jsou poměrně měkké).
- Polymery – většinou polyetylenové, mají velmi dobré kluzné vlastnosti, což usnadňuje vsouvání a vytahování, nevýhodou je však nízký modul pružnosti a malá roztažnost což umožňuje větší distorzi a také rychlé opotřebení polymeru.
- Písek – podobné vlastnosti jako nízko-tavitelné kovy, distorze tvaru je o něco větší, ovšem čas potřebný na plnění je výrazně nižší.
- Tekutiny – nejčastěji voda či olej, ale možné je použít i stlačený vzduch, nevýhodou je poměrně složitý systém plnění a nutnost opatřit trubku ventily.

Pro správné provedení ohybu bez výrazných defektů jsou v literatuře uváděny obecné tabulky. Takovým příkladem je i Tabulka 1 nebo Tabulka 2.

Nomogram pro správnou volbu typu trnu je vyobrazen na obr. 3.9.

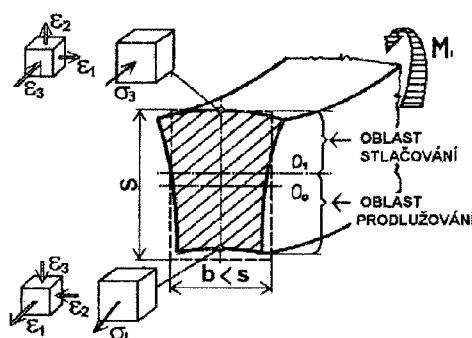


Obr. 3.9 Nomogram pro určení typu trnu [36]

4 ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ A OHYBOVÝ MOMENT

Rozložení napětí a stanovení ohybového momentu je důležitým faktorem pro určení vnějších sil potřebných k provedení ohybu a pro konstrukční řešení ohýbacího zařízení či přípravku. Hodnota ohybového momentu také výrazně ovlivňuje proces odpružení popsany v předešlé kapitole.

4.1 ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ A DEFORMACE PŘI OHYBU [14], [19], [23], [41], [49]

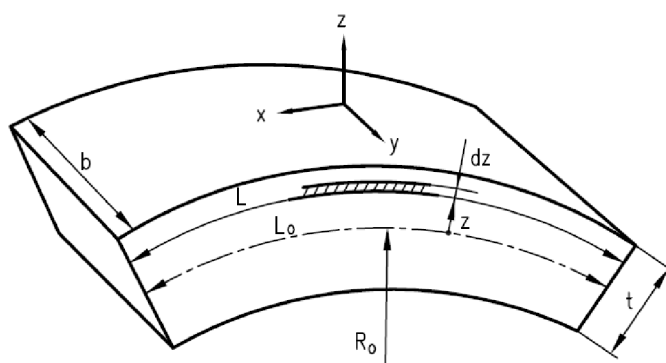


Obr. 4.1 Schéma napjatosti a deformace ohybu tyče [14]

Napjatost a deformace je sledována na jednoduchém případě ohybu tyče obr. 4.1. Při ohybu tyče obdélníkového průřezu, kde šířka je menší než tloušťka, je napětí ve směru šířky tyče možno zanedbat $\sigma_2 = 0$. Napjatost krajních vláken na vnitřní straně odpovídá jednoosému tlaku a na straně vnější jednoosému tahu s trojosou deformací. Vzhledem k průběhu deformace a napjatosti dochází na vnitřní straně ke zmenšování šířky ohýbané tyče a na vnější straně k zvětšování.

Pozn. Kruhové a čtvercové trubky odpovídají, z hlediska napětíovo – deformačních schémat, ohybu tyčí a profilu (na rozdíl od pásů plechů). Při volbě materiálového modelu se pak vychází z předpokladu jednoosé napjatosti, viz. [23].

4.2 VÝPOČET OHYBOVÉHO MOMENTU [2], [14], [19], [23], [41], [49]

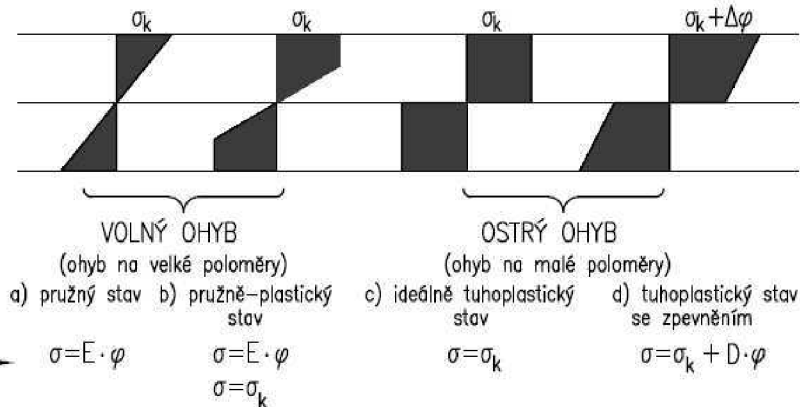
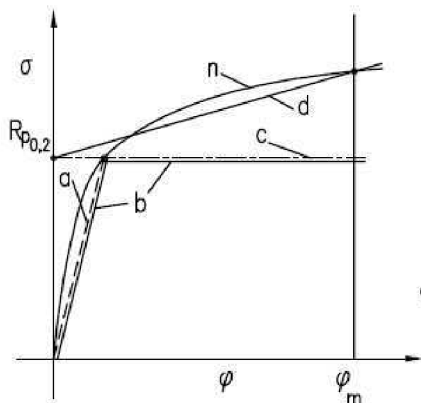


Obr. 4.2 Souřadný systém pro analýzu ohybu. [19], [23]

Obecný vztah pro určení ohybového momentu symetrické plochy udává (16) vzhledem k parametrům na obr. 4.2.

$$M = \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} b \cdot \sigma_x \cdot z \cdot dz = 2 \cdot \int_0^{\frac{t}{2}} b \cdot \sigma_x \cdot z \cdot dz \quad (16)$$

kde: b, t, z – parametry dle obr. 4.2
 σ_x - obecné napětí při ohybu



Obr. 4.3 Aproximace průběhu $\sigma = f(\varphi)$ [41]

Obr. 4.4 Rozložení ohybového napětí [2]

Na obrázku 4.4 jsou znázorněny jednotlivé průběhy napětí při ohybu, jedná se o lineární aproximace obecného průběhu napětí pro zjednodušení výpočtových vztahů, obr. 4.3. Pro volný ohyb (ohyb na velké poloměry) se aplikují průběhy napětí dle obr. 4.4a,b. Pro ohyb ostrý (ohyb na malé poloměry) se aplikují průběhy dle obr. 4.4c,d.

Dosažením aproximovaného napětí do vztahu (16) a následnou integrací získáme ohybové momenty pro jednotlivé průběhy.

Elastický ohybový moment dle obr. 4.4a:

$$M_{Oa} = M_{Oel} = \frac{b \cdot t^2}{6} \cdot \sigma_k \quad (17)$$

kde: σ_k - mez kluzu

Ideálně tuhoplastický ohybový moment dle obr. 4.4c:

$$M_{Oc} = M_{Opl} = \frac{b \cdot t^2}{4} \cdot \sigma_k \quad (18)$$

Ideálně pružně-plastický ohybový moment dle obr. 4.4b:

$$M_{Ob} = \frac{b \cdot t^2}{4} \cdot \sigma_k + \frac{1}{3} \cdot \frac{b \cdot \sigma_k^3 \cdot R_o^2}{E^2} \quad (19)$$

Tuhoplastický ohybový moment se zpevněním dle obr. 4.4d:

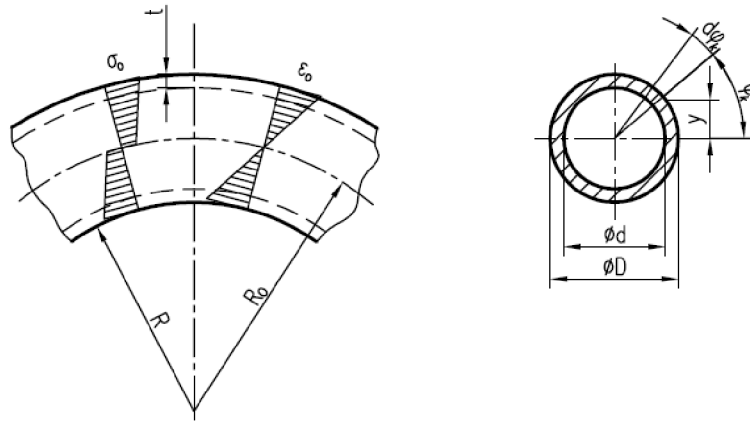
$$M_{Od} = \frac{b \cdot t^2}{4} \cdot \sigma_k + \frac{\bar{D}}{R_o} \cdot \frac{b \cdot t^2}{12} \quad (20)$$

kde: \bar{D} – modul zpevnění

$$\bar{D} = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n \quad (21)$$

kde: K – materiálová konstanta
 n – exponent deformačního zpevnění

4.2.1 Výpočet ohybového momentu trubky [14], [19], [23], [41], [49]



Obr. 4.5 Průběh aproximovaného napětí při ostrém ohybu trubky [49]

Obecný ohybový moment trubky kruhového průřezu lze vzhledem k parametrům na obrázku 4.5 vyjádřit pomocí (22), tedy vztahu analogickému k (16).

$$M = 2 \cdot \int_0^{\pi} \sigma_o \cdot y \cdot dS \quad (22)$$

Uvažujeme-li ohybové napětí pro ostrý ohyb lineárně aproximované dle obr. 4.5 tedy tuhoplastický model se zpevněním, je ohybové napětí dáno vztahem (23).

$$\sigma_o = \sigma_k + \bar{D} \cdot \varepsilon_o \quad (23)$$

Daný integrál (22) je možno po vyjádření ostatních členů rovnice řešit:

$$y = r \cdot \sin(\varphi), \quad dS = r \cdot t_0 \cdot d\varphi, \quad \varepsilon_o = \frac{y}{R_o}, \quad d = 2 \cdot r,$$

$$M = 2 \cdot \int_0^{\pi} \left(\sigma_k + \bar{D} \cdot \frac{r \cdot \sin(\varphi)}{R_o} \right) \cdot r^2 \cdot t_0 \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \quad (24)$$

Po integraci obdržíme vztah:

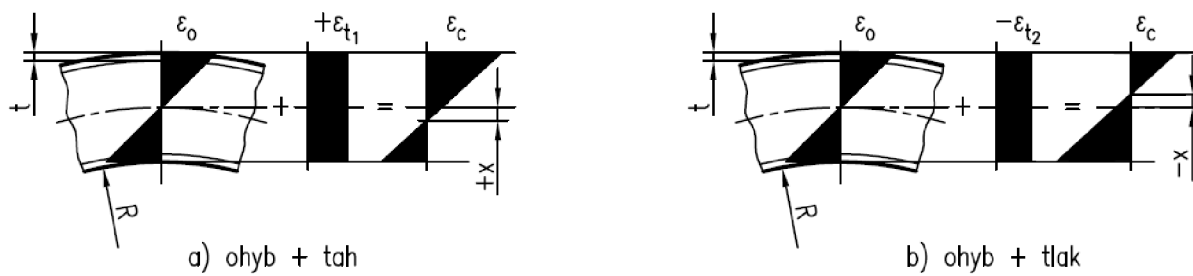
$$M = \sigma_k \cdot d^2 \cdot t_0 + \frac{\bar{D} \cdot d^3 \cdot t_0 \cdot \pi}{8 \cdot R_o} \quad (25)$$

Neuvažujeme-li zpevnění materiálu tedy ideálně tuhoplastický model, pak $\bar{D} = 0$:

$$M = \sigma_k \cdot d^2 \cdot t_0 \quad (26)$$

4.3 PRINCIP SKLADBY OHYBOVÉHO MOMENTU S PŘÍDAVNÝM NAPĚTÍM [34]

Některé technologie (zařízení) umožňují či způsobují, vzhledem ke své konstrukci nebo principu ohyb za současného tahu či tlaku. Tato kombinace vede k posunu osy nulového přetvoření směrem k vnitřnímu poloměru, v případě tahu obr. 4.6a, nebo vlivem tlaku směrem k vnějšímu poloměru obr. 4.6b.



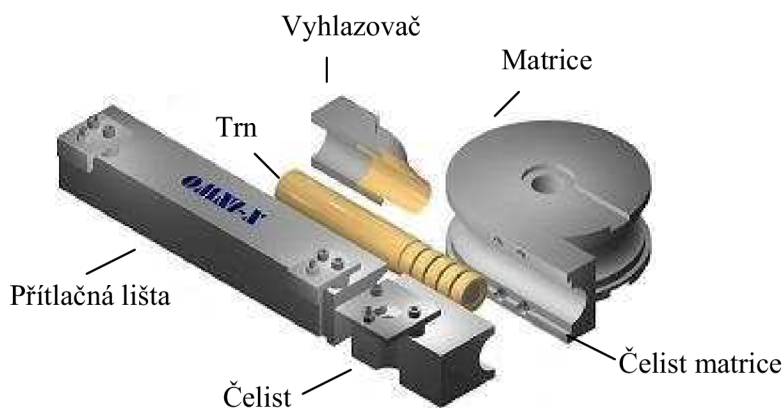
Obr. 4.6 Princip skladby ohybového momentu s přidavným napětím [34]

5 NÁSTROJE A NÁŘADÍ PRO OHÝBÁNÍ [5], [29], [36], [42]

Velmi důležitou součástí úspěšného ohybu je po volbě metody, volba vhodných nástrojů a nářadí. Správná volba vede ke kvalitnímu provedení přesného ohybu bez zásadních problémů a defektů, naopak špatná nebo nevhodná volba vede ke vzniku defektů a vad, které mohou mít zásadní vliv na funkčnost dílce.

Velmi důležitým faktorem pro správnou volbu nástrojů a nářadí je velikost objemu výroby, zda se jedná o kusovou či sériovou výrobu. Dalším důležitým faktorem jsou požadavky na samotný dílec - jeho tvar, rozměrová přesnost, geometrická přesnost a také polotovar z kterého je dílec ohýbán. Výrobní cena dílce je v poslední době zásadní faktor, který vstupuje do procesu ohýbání a tedy i do volby nástrojů. Tento faktor někdy až zásadně rozhoduje o možnostech volby nástrojů a nářadí, především z hlediska jejich geometrické přesnosti, použitého materiálu či jeho povrchových úprav.

Po uvážení všech těchto faktorů následuje samotný návrh či volba nástrojů a nářadí. Na obr. 5.1 je schéma nástroje pro technologii ohybu pomocí navíjení. Popis jednotlivých částí tohoto nástroje je uveden níže. Nejlepší variantou je nákup všech částí nástroje současně a předejetí tak možným komplikacím a vznikům defektů, které mohou nastat z důvodu nesrovnalostí a nezapadnutí jednotlivých částí k sobě.



Obr. 5.1 Schéma funkčních částí nástroje ohýbačky [29]

5.1 JEDNOTLIVÉ ČÁSTI NÁSTROJE

5.1.1 Matrice [5], [29], [36], [42]

Matrice je základní nástroj, jedná se v podstatě o formu, podle které je trubka ohýbána a určuje poloměr ohybu trubky. Nejčastěji je vyrobena z kalené nástrojové oceli nebo legované oceli a tepelně zpracována popřípadě nitrídována, dle požadavku. Na obr.5.2 jsou vyobrazeny základní typy matic s popisem. Volba typu záleží na parametrech polotovaru, ohybu a použitém zařízení.



Obr. 5.2 Základní typy matic [29]

Pro volbu matrice je také důležité uvážit, zda postačuje komerční nástroj nebo je třeba nástroje precizního. Volba závisí na dané aplikaci, například pro ohyb silnostěnné trubky na velký poloměr ohybu postačují komerčně vyráběné nástrojové sady. Pro ohyb tenkostěnných trubek například pro letecký průmysl je třeba přesnějších preciznějších nástrojů, což se samozřejmě výraznou mírou projeví na ceně nástroje jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly.

Důležitým faktorem ovlivňující kvalitu ohybu je délka a povrch drážky matrice. Možnosti povrchových úprav jsou tryskání, karbidový nástřik nebo rýhování (vroubkování) obr. 5.3. Povrchových úprav je obecně užíváno v případech, kdy je nutné zvýšit upínací sílu a standardní drsnost povrchu nepostačuje nebo v případě, že je třeba zkrátit délku upínací části například u dílců vícenásobně ohýbaných s krátkou vzdáleností mezi ohyby. Upínací část matrice může být i vyměnitelná, jak ukazuje obr. 5.3.



Obr. 5.3 Úprava drážky rýhováním. [18] Obr. 5.4 Vyměnitelná upínací část matrice [18]

Speciální aplikací je matrice s tvarovými výstupky v drážce obr. 5.5, kdy je možné při ohybu bez výplně cíleně kontrolovat tlakové působení na vnitřní stěně, tvarováním přes tvarové výstupky v matici. Tímto způsobem se eliminují či řídí defekty, které způsobuje tlakové napětí. Jednou z aplikací pro kruhové trubky je tzv. „wrinkle bending“, kterého se využívá při tvarování trubek pro tepelné výměníky, příklad vyrobené součásti je na obr. 5.6.



Obr. 5.5 Tvarovaná matrice [43] Obr. 5.6 Součást vyrobená pomocí tvarované matrice [18]

5.1.2 Čelist [5], [29], [36], [42]

Úkolem čelisti či upínky je udržovat po celou dobu procesu pevně sevřený konec trubky. Trubka nesmí během procesu klouzat, jedině tak je možné dosáhnout kvalitního ohybu. Materiály této části nástroje jsou stejné jako u matrice, tedy nejčastěji z kalené nástrojové oceli nebo legované oceli a tepelně zpracována či nitridována. Čelist musí mít stejnou délku a povrchovou úpravu jako upínací část matrice, jedině tak je možné docílit pevnému sevření trubky a zamezení defektů.

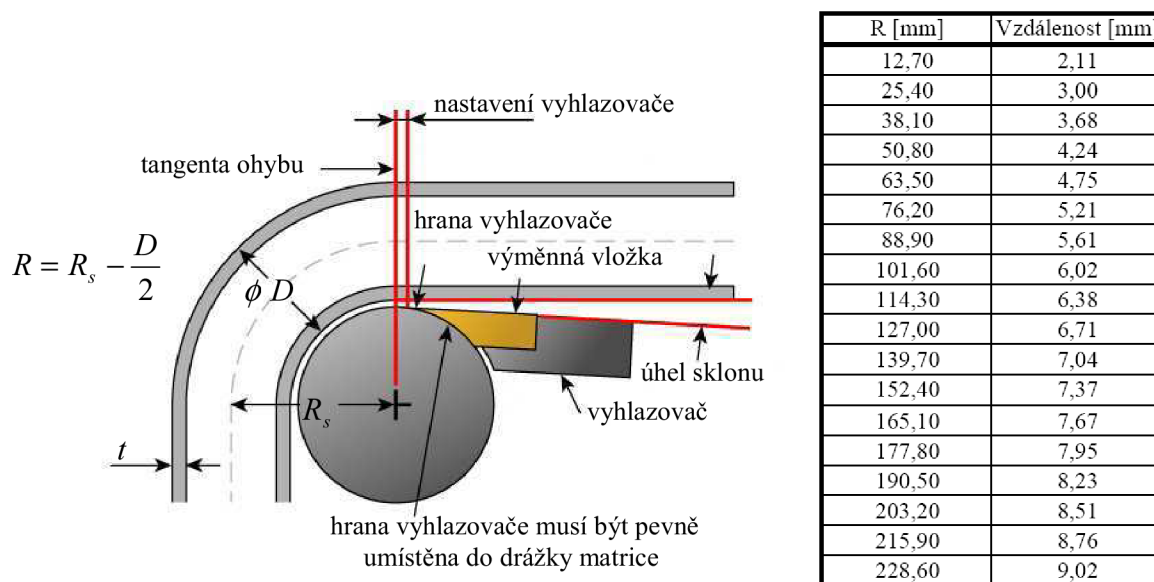
5.1.3 Přítlačná lišta [5], [29], [36], [42]

Funkce přítlačné lišty je udržovat konstantní tlak mezi trubkou a maticí především v tangente (bodě) ohybu. Přítlačná lišta se nejčastěji pohybuje spolu s trubkou ve směru ohybu. Další možností je pevná přítlačná lišta po které trubka klouže do místa ohybu. Pevná

přítlačná lišta je často nahrazována rotačními válci. Lišty jsou vyráběny z různých materiálů, nejčastěji se jedná o nitridované legované oceli, zakalené uhlíkové oceli, nástrojové oceli, v případě pevných přítlačných lišt i hliníkové bronzы. Některé zařízení umožňují nejen vedení lišty spolu s trubkou do místa ohybu, ale i přídavnou tlakovou sílu, která je právě vyvozována přítlačnou lištou. V případě takového zařízení je většinou nutné přítlačnou lištu povrchově upravit například tryskáním podobně jako matici a čelist. Některá zařízení využívají místo přítlačné lišty několik za sebou umístěných rotačních válců plnících stejnou funkci.

5.1.4 Vyhlazovač [5], [29], [36], [42]

Vyhlazovače se užívá především při ohybu tenkostěnných trubek. Oblast na vnitřní straně ohybu je namáhána tlakovým napětím a úkolem vyhlazovače je aby nedošlo ke vzniku zvlnění. Důležitým faktorem pro správnou funkci je materiál vyhlazovače. Pro železné kovy a titanové slitiny se používají nejčastěji hliníkové bronzы, pro neželezné materiály jsou vyhlazovače vyrobeny z oceli. Pro snížení tření mezi vyhlazovačem a trubkou je možné vyhlazovač pochromovat. Vyhlazovače se ve většině případů vyrábějí ze stejných materiálů, jako trny (viz. další podkapitola) u kterých je tato problematika popsána podrobněji. Pro správnou funkci vyhlazovače a jeho životnost je nutná jeho přesná poloha, vzdálenost od tangenty (bodu) ohybu a nastavení sklonu viz. obr 5.7.



Obr. 5.7 Nastavení vzdálenosti vyhlazovače od tangenty ohybu [5], [29]

Na obr. 5.9 jsou základní typy vyhlazovačů. Čtvercový vyhlazovač vyrobený z jednoho kusu, který je vhodný pro vysoce kvalitní ohyby, kdy je důležitá jeho pevnost. Vyhlazovač s výměnou vložkou se používá pro velké výrobní série.



Obr. 5.8 Kuličkový trn s otvorem pro přívod maziva [42]



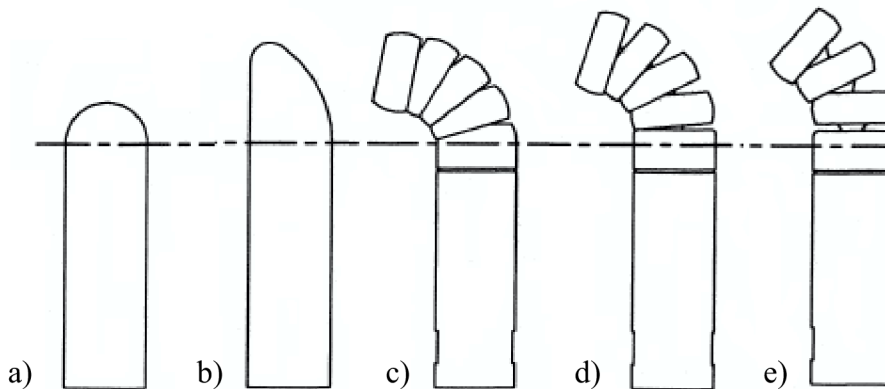
Obr. 5.9 Typy vyhlazovačů [29]

5.1.5 Trny [5], [18], [29], [36], [42]

Hlavní funkcí trnu je potlačení vzniku defektů na vnitřní stěně trubky. Trn je klíčovým prvkem pro dosažení ohybů vysokých kvalit. Podobně jako vyhlazovač se trny používají především při ohybu tenkostěnných trubek. Pro ohýbání trubek z nerezových ocelí, titanu a dalších materiálů s vysokým obsahem niklu a chromu se používají trny vyrobené z hliníkových bronzů, které mají nejlepší vlastnosti. Pro všechny ostatní materiály (jako uhlíková ocel, hliník měď a jejich slitiny) se vzhledem ke stále rostoucí ceně mědi vyrábějí trny z uhlíkové nebo nástrojové oceli. Výrobci nástrojů se kromě standardních povrchových úprav těchto ocelí snaží nabídnout jiné možnosti pro poskytnutí co nejlepších vlastností a životnosti. Například česká firma OMNI-X CZ s.r.o. nabízí vlastní řešení v podobě kalené nástrojové oceli s povrchovou úpravou „OMNI-X černý chrom“ nebo americká firma Tools For Bending, Inc., která nabízí povrchovou úpravu s obchodním označením „Kro-Lon“.

Správná volba trnu je zásadní z hlediska výsledného ohybu. Základní typy trnů:

1. Jednoduchý trn – vhodný pro silnostěnné trubky a velké poloměry ohybu, obr. 5.10a.
2. Jednoduchý formovaný trn – vhodný pro silnostěnné trubky s malým poloměrem ohybu, tvarový konec poskytuje větší oporu uvnitř trubky, obr. 5.10b
3. Standardní kuličkový trn – vhodný pro standardní sílu stěny a poloměr ohybu, nejrozšířenější trn s jedním či více segmenty (kuličky), obr. 5.10c
4. Tenkostěnný kuličkový trn – vhodný pro tenkostěnné trubky a menší poloměry ohybu, tyto trny mají vždy spojovací články o velikost menší, tím jsou kuličky blíže sobě a poskytují větší oporu během ohýbání, obr. 5.10d.
5. Ultra tenkostěnný trn – vhodný pro trubky s velmi malou tloušťkou stěny a pro velmi malé poloměry ohybu, podobně jako tenkostěnný kuličkový trn má menší velikost spojovacích článků, v tomto případě o dvě velikosti, tím jsou kuličky ještě blíže a poskytují ještě větší oporu, obr. 5.10e.



Obr. 5.10 Základní typy trnů [42]

Volba vhodného trnu závisí především na základních parametrech ohybu, tedy relativní tloušťce t/D a relativním poloměru ohybu R_0/D . Obecný nomogram pro potřebu trnu byl již uveden v kapitole 3.3. Výrobci nástrojů nabízí většinou své přehledy pro volbu nástrojů, Tabulka 3 pro výběr trnu a vyhlazovače od firmy OMNI-X je jeho ukázkou. Další tabulky výrobců pro volbu nástroje jsou uvedeny v Příloze 1.

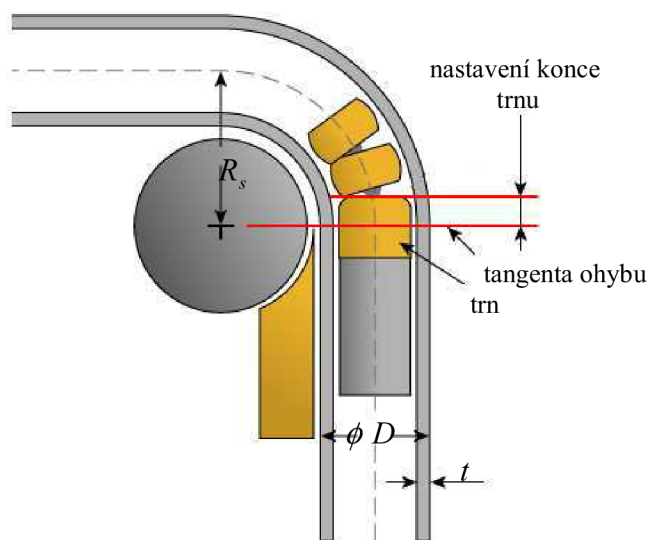
Pro správnou funkci trnu je důležité jeho nastavení, při správném nastavení je konec těla trnu vždy za tangentou (bodem) ohybu, jak je vidět na obr. 5.11 kde je uvedena i tabulka nastavovacích teoretických vzdáleností vzhledem k průměru trubky. Trubka musí vždy dobře klouzat po délce trnu, z tohoto důvodu je mezi trnem a trubkou vždy vůle.

Tabulka 3 Výběr trnu a vyhlazovače [29]

"D" ohybu = R_s/D

	1	1,25	1,5	2	2,5	3	4	5
10	M1	M1	M1	M1	P	P		
15	M1W	M1W	M1	M1	P	P		
20	M2W	M2W	M1W	M1	M1	M1	P	
25	M3W	M2W	M1W	M1W	M1	M1	M1	
30	M3W	M3W	M2W	M2W	M1W	M1	M1	M1
35	M3W	M3W	M3W	M2W	M2W	M2W	M2	M1
40	M4W	M3W	M3W	M3W	M3W	M3W	M2W	M2
45	M4W	M3W	M3W	M3W	M3W	M3W	M2W	M2W
50	M4W	M3W	M3W	M3W	M3W	M3W	M2W	M2W
60	M4W	M4W	M3W	M3W	M3W	M3W	M2W	M2W
70	TW5W	TW5W	TW5W	M3W	M3W	M3W	M3W	M2W
80	TW5W	TW5W	TW5W	TW5W	M3W	M3W	M3W	M2W
90	TW5W	TW5W	TW5W	TW5W	M3W	M3W	M3W	M3W
100	TW5W	TW5W	TW5W	TW5W	TW5W	M3W	M3W	M3W
125	TW5W	TW5W	TW5W	TW5W	TW5W	TW5W	M4W	M4W
150	TW6W	TW6W	TW6W	TW6W	TW5W	TW5W	TW4W	TW4W
175	TW7W	TW7W	TW7W	TW7W	TW7W	TW6W	TW6W	TW6W
200	TW10W	TW10W	TW10W	TW10W	TW9W	TW9W	TW8W	TW8W
225		UTW10W	UTW10W	UTW10W	TW10W	TW10W	TW10W	TW10W
250			UTW10W	UTW10W	UTW10W	UTW10W	UTW10W	UTW10W
275			UTW10W	UTW10W	UTW10W	UTW10W	UTW10W	UTW10W

P - jednoduchý trn TW - tenkostěnný kuličkový trn 1,2,...,10 = počet kulových segmentů
 M - kuličkový (standardní) trn UTW - ultra tenkostěnný kuličkový trn W - nutný vyhlazovač



D [mm]	Vzdálenost [mm]
7,95-12,50	2,00
12,60-15,80	2,50
15,90-18,90	3,00
19,00-23,90	4,30
24,00-28,40	5,20
28,50-37,50	3,10
38,00-43,50	3,10
44,00-53,00	4,80
53,50-66,00	6,50
66,50-85,00	6,40
85,50-117,00	7,90
117,50-155,00	9,50

Obr. 5.11 Nastavení vzdálenosti trnu od tangenty ohybu [29], [42]

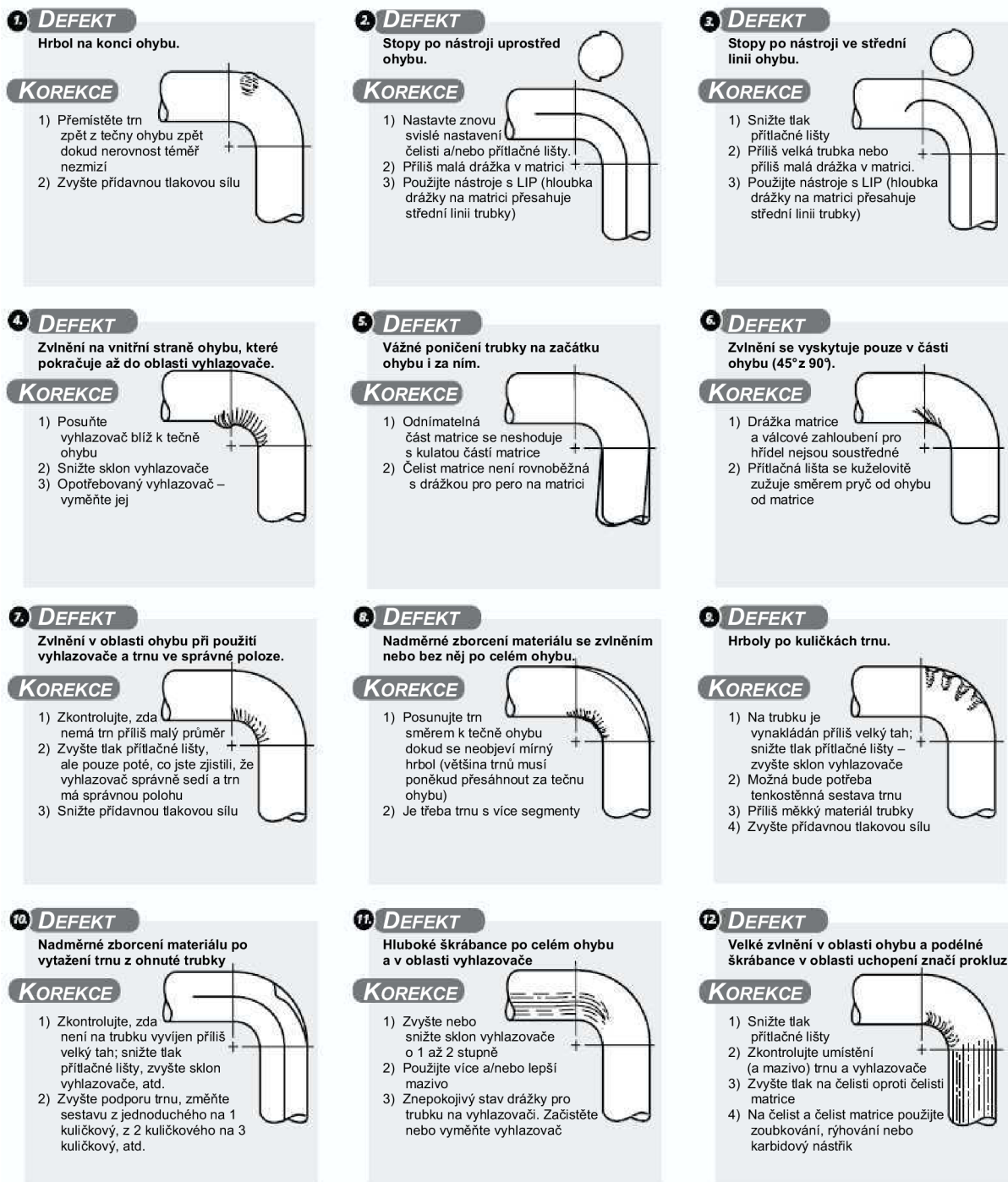
5.2 MAZIVA [29], [36]

Úspěšnost ohybu především, co se přesnosti a kvality vnitřního povrchu trubky týče, závisí do jisté míry i na typu použitého maziva. Mazivo se nanáší buď přímo na trn, nebo se přivádí otvorem v trnu, jak je vidět na obr. 5.8. Doporučuje se také vymazat vnitřek trubky

hustým lubrikantem. Při výběru maziva se musí uvážit ohýbaný materiál, například přísady jako síra či chlorid jsou nevhodné pro nerezové oceli nebo měď, protože způsobují skvrnitost nebo dokonce korozi trubky.

5.3 DEFEKTY ZPŮSOBENÉ ŠPATNÝM NASTAVENÍM NÁSTROJŮ [29], [42]

Použitím vhodných nástrojů je možné zamezit či alespoň snížit vznik defektů při ohybu. Pro správný a kvalitní ohyb je ovšem potřeba tyto nástroje správně nejen zvolit, ale především je poté správně umístit, jak je již uvedeno v předchozím popisu jednotlivých částí. Nesprávné nastavení snižuje životnost nástrojů a především může způsobit vznik nepřipustných defektů. Některé z těchto defektů znázorňuje obrázek 5.12 včetně popisu a důvodu vzniku.



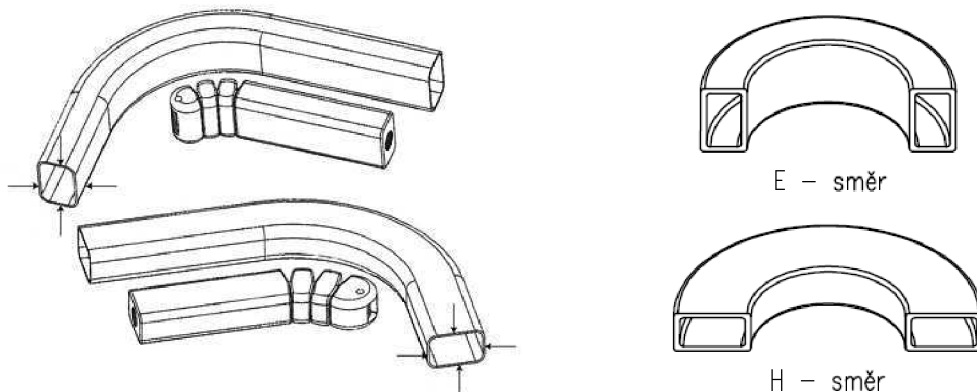
Obr. 5.12 Přehled defektů způsobených nesprávným nastavením nástrojů [29], [42]

6 APLIKACE POZNATKŮ NA OHYB TRUBEK ČTVERCOVÉHO PRŮŘEZU [26], [31], [37], [42], [46]

Trubky čtvercového průřezu, na které je konkretizováno zadání diplomové práce nacházejí čím dál tím větší uplatnění v průmyslu. Nejčastěji jsou používány v nábytkářském průmyslu, architektuře a své uplatnění v poslední době nacházejí v automobilovém průmyslu. A to především jako rámy a výztuhy karosérie, vzhledem k dobrému poměru pevnosti a hmotnosti, což je zároveň i příklad zkoumané součásti závěsu pátých dveří automobilu. Velkou výhodou je také designové resp. estetické hledisko profilu. Za další přednost je možné považovat, vzhledem k čtvercovému profilu resp. jeho rovným plochám, příznivější tvar pro uchycení a polohování součásti oproti trubkám kruhového průřezu. Tyto plochy mnohdy usnadňují další časté výrobní operace, jako je frézování, řezání, děrování či svařování a rovněž i následnou montáž výrobního celku.

Problematika ohybu trubek čtvercového průřezu není příliš prozkoumána a v odborné literatuře je o této problematice jen velmi málo, většinou pouze obecných, informací. Taktéž informací od výrobců zařízení a především od výrobců nástrojů pro ohýbání trubek je málo. Z těchto důvodů jsou při analýze problematiky ohybu čtvercových trubek uplatněny především poznatky z ohybu trubek kruhových. Ty jsou, vzhledem ke své geometrii, čtvercovým trubkám nejbližší a byly popsány v předešlých kapitolách. Dále jsou zde uvedeny vlastními úvahami a poznatky s cílem určit jednotlivé odlišnosti čtvercové trubky od kruhové.

Obecně je ohyb čtvercových trubek složitější a komplikovanější než ohyb trubek kruhových z důvodu odlišného zatížení přenášeného profilem trubky, jak bude blíže popsáno dále.



Obr. 6.1 Poloha průřezu vůči rovině ohybu [37], [46]

Trubky čtvercového průřezu spadají spolu s oválným a obdélníkovým průřezem mezi nejpoužívanější profily nekruhového průřezu. U hranatých trubek se rozlišuje, podle polohy průřezu vůči rovině ohybu, na tzv. E-směr a H-směr (z anglických zkratk Easy-way a Hard-way), obr. 6.1. Z tohoto pohledu je čtvercový průřez přesně na rozhraní.

6.1 PARAMETRY OHYBU TRUBEK ČTVERCOVÉHO PRŮŘEZU [9], [19], [26], [33], [49]

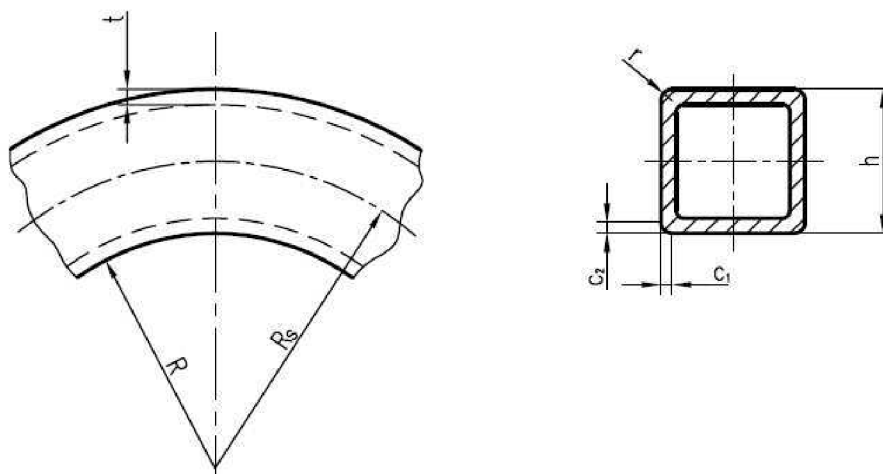
Vzhledem k tomu, že se jedná o dutý průřez s rovnoměrnou tloušťkou stěny lze při definici parametrů přihlédnout k poznatkům z ohybu trubek kruhových. S určitým přiblížením je tak možné definovat tyto hlavní technologické parametry $\frac{t}{D}$, $\frac{R_s}{D}$ nahrazením průměru trubky D za výšku profilu h . Za poloměr ohybu je uvažován vnitřní poloměr ohybu R na rozdíl od středního poloměru ohybu R_s u trubek kruhových, obr. 3.2.

Hlavní technologické parametry čtvercových trubek tedy jsou:

— relativní tloušťka stěny $\frac{t}{h}$ (27)

— relativní poloměr ohybu $\frac{R}{h}$ (28)

kde: t – tloušťka stěny trubky
 h – výška profilu trubky
 R – vnitřní poloměr trubky



Obr. 6.2 Geometrické parametry čtvercové trubky

Relativní tloušťka stěny určuje při ohybu kulatých trubek hranici mezi tenkostěnnými a tlustostěnnými trubkami a má také největší vliv na zborcení průřezu trubky (zvlnění, změna průřezu). U hranatých trubek je ovšem hledání hranice mezi tenkostěnnými a tlustostěnnými trubkami diskutabilní, tedy i parametr t/h je v tomto smyslu diskutabilní. Lze rovněž předpokládat, že vliv tohoto parametru na zvlnění vnitřní stěny bude méně výrazný vzhledem k čtvercovému profilu trubky, kde jednotlivé rohy působí jako stabilizační (tuhostní) prvky oproti trubkám kulatým, které je nemají. Podobně jako Tabulka 1,2 pro kruhové trubky, je v [26] prezentována Tabulka 4, která udává minimální poloměry ohybu pro čtvercové trubky, kterých je možné dosáhnout bez vzniku zvlnění.

Tabulka 4 Minimální poloměry ohybu pro čtvercové trubky [26]

Vnější průměr trubky mm	Minimální střední poloměr ohybu pro tloušťku stěny:			
	2,11 mm	1,65 mm	1,25 mm	0,89 mm
12,70	41,28	44,45	47,63	50,80
19,05	50,80	50,80	63,50	76,20
25,40	76,20	76,20	88,90	101,60
28,58	76,20	76,20	88,90	101,60
31,75	88,90	88,90	101,60	-
38,10	114,30	114,30	127,00	-
44,45	152,40	165,10	177,80	-
50,80	177,80	215,90	228,60	-
63,50	228,60	266,70	-	-
76,20	304,80	2381,00	-	-

Porovnáním těchto tabulek lze rovněž sledovat, že minimální poloměr ohybu je pro čtvercové trubky buď stejný a pro velkou řadu rozměrů nižší (ostřejší ohyb). S určitým přiblížením a rezervou lze částečně pozorovat menší náchylnost čtvercových trubek ke vzniku zvlnění na vnitřní stěně trubky. K této úvaze je ovšem nutné podotknout, že tabulky nejsou ze stejného zdroje a tabulka pro čtvercové trubky poskytuje detailnější informace než tabulka pro trubky kruhové.

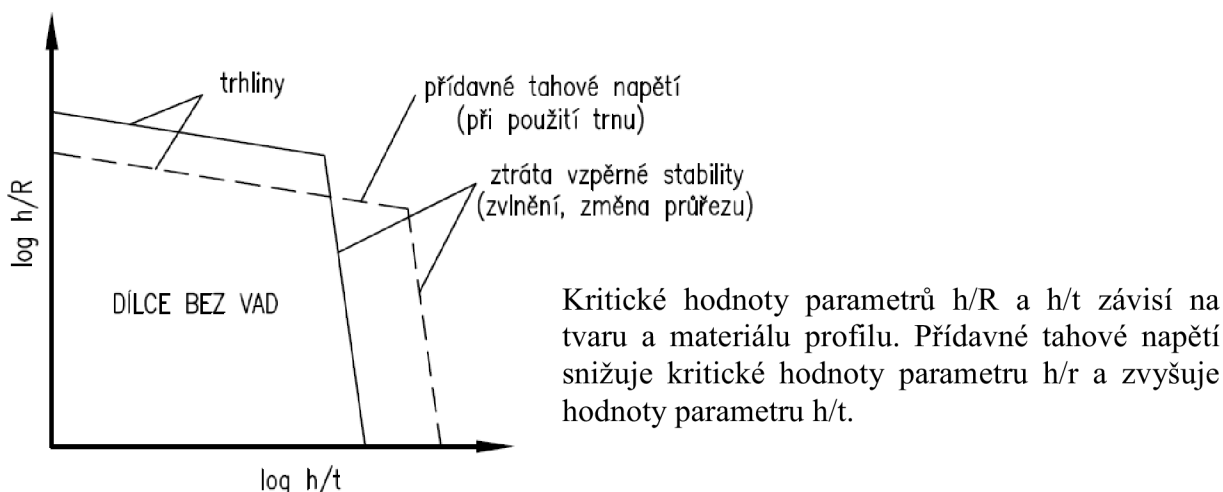
Relativní tloušťka stěny souvisí se změnou průřezového tvaru z hlediska distorze, kterou lze vzdáleně přirovnat ke vzniku ovality u kulatých trubek. Tedy čím tenčí bude stěna trubky tím dříve dojde k distorzi příčného průřezu.

Podobně jako parametr R/t při ohybu plechů, určuje parametr R/h ostrost ohybu a jeho hlavní vliv je na vznik případných trhlin vlivem ztenčování stěny trubky na vnější straně ohybu. Za ohyb ostrý (ohyb na malé poloměry) je považován $\frac{R}{h} < 6$ naopak pokud je hodnota

$\frac{R}{h} \geq 6$ jde o ohyb volný (ohyb na velké poloměry), dle [49].

Predikci vzniku defektů je také možno sledovat pomocí limitních diagramů. Mezi základní typy těchto diagramů patří diagram mezní plasticity (DMP), diagram mezní tvařitelnosti Keller - Goodwin (DMT-KG) a limitní diagram technologické tvařitelnosti (LDTT). Posledně jmenovaného diagramu se využívá u technologií jako je tažení, lemování, tlačení, zakružování či ohýbání. Jedná se o mezní diagramy, jejichž osový systém představují geometrické parametry dílců konkrétní technologie. Mezní křivky těchto diagramů představují hranice mezi dílci bez vad a dílci s defekty. Velkou výhodou těchto typů diagramů je, že mohou být používány již při konstrukčním návrhu dílců.

Schématický LDTT diagram Woodova typu dle [19], [33] pro ohyb profilů je znázorněn na obr. 6.3. Na tomto diagramu je dobře vidět vliv jednotlivých parametrů na proces ohybu a rovněž jejich vzájemná provázanost, kdy zborcení průřezu závisí především na parametru h/t ale také na parametru h/R . Ztenčení stěny trubky, které vede ke vzniku trhlin na vnější straně ohybu závisí nejvíce na parametru h/R , ale rovněž je zde i určitý vliv h/t .



Obr. 6.3 Schématický LDTT diagram pro ohyb profilů [19], [33]

Jako určitý parametr při ohybu trubek čtvercového průřezu lze považovat poloměr zaoblení rohů r , obr. 6.2. Další definovaný technologický parametr při ohybu čtvercových trubek tedy je:

$$\text{— poloměr zaoblení rohů } r \quad (29)$$

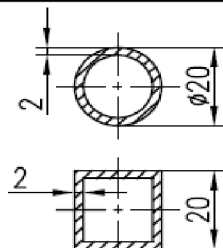
Pozn. norma ČSN EN 10305, ocelové trubky pro přesné použití [9], neuvažuje zaoblení rohů jako takové, ale uvažuje jednotlivé tolerované vzdálenosti c_1 a c_2 od stěny trubky, viz obr. 6.2.

Velikost tohoto zaoblení má velmi výrazný vliv zejména na průřezové charakteristiky, ale také na tok materiálu během ohybu popsaném v následující kapitole. Průřezové charakteristiky, především kvadratický a statický moment obr. 6.6, mají významný vliv na proces ohybu. Se změnou kvadratického momentu se mění i tzv. ohybová tuhost ($E \cdot I$). Tabulka 5 porovnává průřezové charakteristiky kruhového a čtvercového průřezu (bez zaoblení rohů) při stejných vnějších rozměrech 20 mm a tloušťce stěny 2 mm.

Z vypočítaných hodnot je zřejmé, že průřezové charakteristiky čtvercového průřezu jsou vyšší. Například kvadratický moment průřezu čtvercové tyče je o 70% větší než kvadratický moment kruhového průřezu, tedy i ohybová tuhost čtvercové trubky je o 70% větší. To potvrzuje předpoklad, že technologické parametry ohybu čtvercových trubek nelze přímo porovnávat s technologickými parametry ohybu trubek kruhových.

Tabulka 5 Porovnání průřezových charakteristik

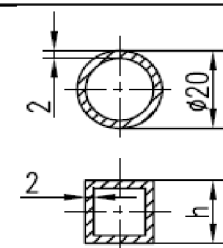
průřez trubky (20x2) mm	průřezové charakteristiky		
	plocha S	statický moment S_p	kvadratický moment I
kruhový	113 mm ²	648 mm ³	4637 mm ⁴
čtvercový	144 mm ²	976 mm ³	7872 mm ⁴
<i>rozdíl</i>	<i>28%</i>	<i>50%</i>	<i>70%</i>



Zajímavé je porovnání obou průřezů z hlediska rovnosti jednotlivých charakteristik při zachování tloušťky stěny. Jako výchozí je rovněž brána kruhová trubka o průměru 20 mm a tloušťce stěny 2 mm. Vypočítané hodnoty vnějšího rozměru čtvercové trubky jsou v Tabulce 6. Z těchto vypočítaných hodnot plyne, že kruhovou trubku o vnějším rozměru 20 mm je možné nahradit čtvercovou trubkou o rozměru přibližně 17 mm, při zachování stejné tloušťky stěny 2 mm.

Tabulka 6 Rozměry čtvercové trubky při stejných průřezových charakteristikách

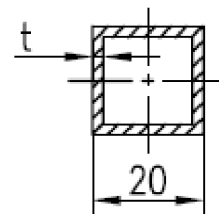
rozměr trubky (t=2 mm)	průřezové charakteristiky		
	$S = 113 \text{ mm}^2$	$S_p = 648 \text{ mm}^3$	$I = 4637 \text{ mm}^4$
kruhové	20,00 mm	20,00 mm	20,00 mm
čtvercové	16,14 mm	16,65 mm	17,06 mm
<i>rozdíl</i>	<i>19%</i>	<i>17%</i>	<i>15%</i>



Podobné porovnání je uvedeno v Tabulce 7, která porovnává průřezové charakteristiky čtvercové trubky při rozdílných tloušťkách stěny. Z porovnání průřezových charakteristik plyne, že z hlediska možnosti náhrady trubky kruhového průřezu čtvercovým by již stejnou ohybovou tuhost při zachování vnějších rozměrů poskytla čtvercová trubka o tloušťce stěny 1,25 mm. Tento hmotnostní efekt je nutné mít na paměť v současném záměru snižovat hmotnosti tzv. lehčených konstrukcí (automobily, letadla, rakety,...). Charakter změny jednotlivých charakteristik je znázorněn pomocí grafu 2.

Tabulka 7 Průřezové charakteristiky čtvercové trubky při rozdílných tloušťkách stěny

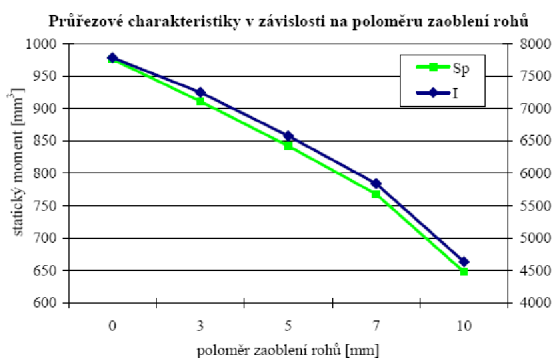
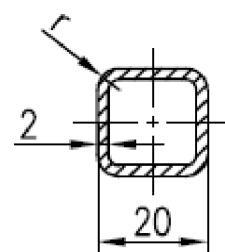
tloušťka stěny trubky	průřezové charakteristiky	
	statický moment S_p	kvadratický moment I
1	542 mm ³	4585 mm ⁴
1,25	660 mm ³	5518 mm ⁴
1,5	772 mm ³	6373 mm ⁴
1,75	877 mm ³	7157 mm ⁴
2	976 mm ³	7872 mm ⁴



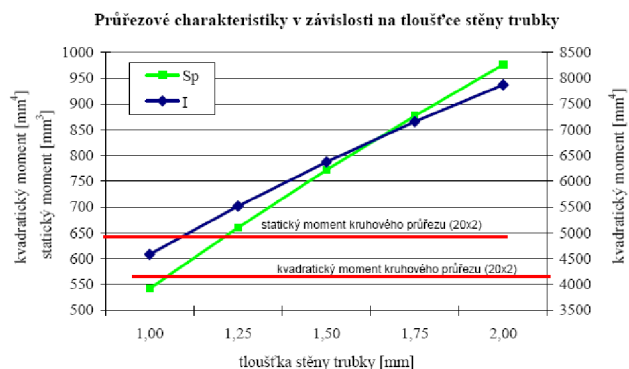
Předchozí vypočítané hodnoty uvažují čtvercový průřez bez zaoblení rohů, tedy limitní případ. Jde tak o maximální rozdíly mezi kruhovým a čtvercovým průřezem. Se zvyšujícím se poloměrem zaoblení rohů se budou jednotlivé rozdíly mezi průřezy snižovat až do dalšího limitního případu, kdy je poloměr zaoblení rohu roven polovině výšce profilu a stává se z něj profil kruhový. Předchozí tvrzení dokládá Tabulka 8, která porovnává průřezové charakteristiky čtvercového průřezu s různým zaoblením rohů, dle obr. 6.5. Charakter změny jednotlivých veličin znázorňuje graf 1. Z předchozího rovněž vyplývá, že ostrý poloměr zaoblení, který je realitou zkoumané součásti ovlivní značně ohybovou tuhost $E \cdot I$ daného průřezu.

Tabulka 8 Průřezové charakteristiky čtvercové trubky při rozdílném zaoblení rohů

poloměr zaoblení rohů	průřezové charakteristiky	
	statický moment S_p	kvadratický moment I
R0	976 mm ³	7872 mm ⁴
R3	911 mm ³	7249 mm ⁴
R5	842 mm ³	6577 mm ⁴
R7	768 mm ³	5841 mm ⁴
R10	648 mm ³	4637 mm ⁴



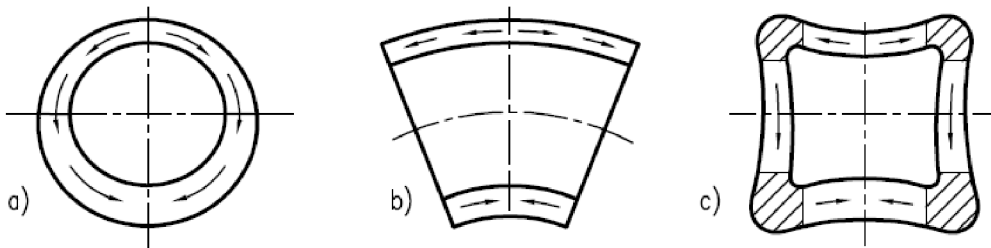
Graf 1 Závislost $S_p, I = f(R)$



Graf 2 Závislost $S_p, I = f(t)$

6.2 ZMĚNA PRŮŘEZU A SOUVISEJÍCÍ PROBLÉMY [31], [36]

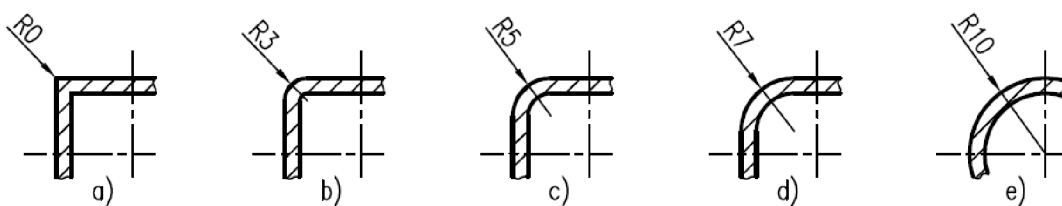
Z hlediska tvaru představují kruhové trubky příznivý průřez pro přenos upínací síly prostřednictvím čelisti na matici. Zároveň také umožňují lepší tok materiálu ve všech směrech během ohybu. Trubky čtvercové tyto výhody, vzhledem k průřezu a jeho krajním bodům (rohům), nemají. Vzhledem k těmto poznatkům má čtvercový průřez větší náchylnost ke vzniku změny průřezu, ztenčení. Tok materiálu vzhledem k působení tahového napětí na vnější straně ohybu a tlakového napětí na vnitřní straně ohybu znázorňuje obr. 6.4b, tento tok je shodný pro oba průřezy. Obr. 6.4a znázorňuje plynulý tok materiálu při ohybu kruhové trubky. Při ohybu trubky čtvercového průřezu není, vzhledem k rohům, plynulý tok materiálu umožněn, obr. 6.4c.



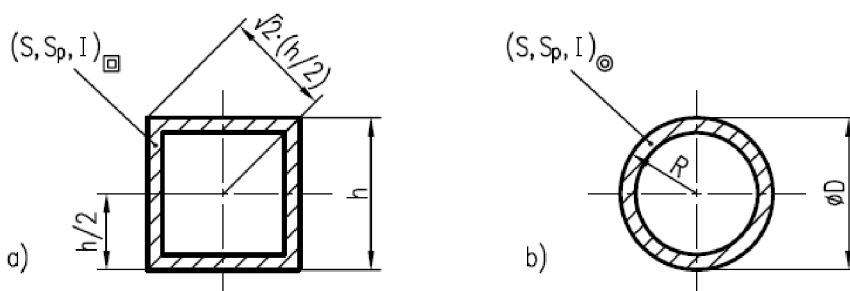
Obr. 6.4 Materiálový tok při ohybu trubek.

Parametr r - poloměr zaoblení rohů má rovněž vliv na tok materiálu při ohybu. Obr. 6.5 ukazuje různé poloměry zaoblení pro trubku s jmenovitým rozměrem 20 mm. V limitním případě, kdy je poloměr zaoblení rohu nulový obr. 6.5a, dochází k nejméně příznivé situaci pro tok materiálu podél profilu. Se zvyšováním poloměru zaoblení se zlepšuje i tok materiálu až do dalšího limitního případu, kdy je poloměr zaoblení roven polovině vnějšího rozměru trubky a z čtvercového průřezu se stává kruhový.

Z předešlé úvahy lze usuzovat, že plynulému toku materiálu při ohybu čtvercových trubek brání rozdílné vzdálenosti jednotlivých částí trubky od těžiště průřezu, kdy rozměr přes rohy je poměrně větší než vzdálenost kolmých stěn, obr. 6.6a. Kruhový průřez má tuto vzdálenost konstantní po celém obvodu průřezu, obr. 6.6b.



Obr. 6.5 Poloměry zaoblení rohů trubky

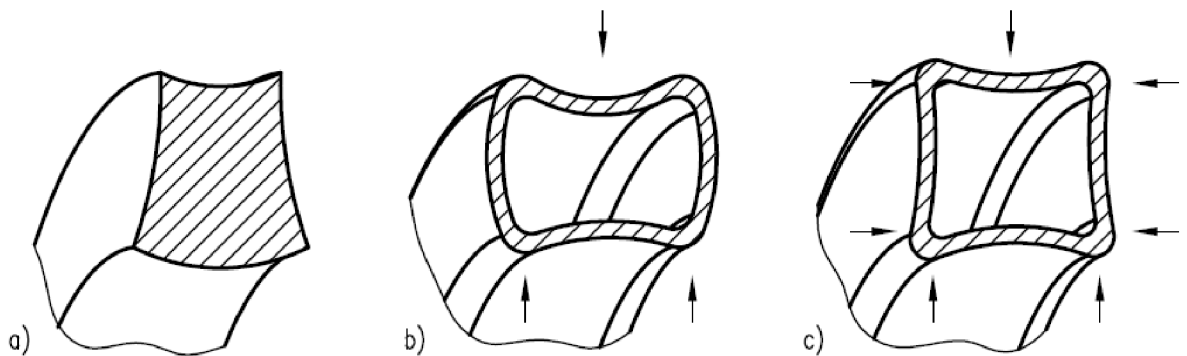


Obr. 6.6 Průřezové charakteristiky a rozměry trubky

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4 napětovo-deformační schéma ohybu tyče odpovídá i ohybu trubek čtvercového průřezu. Proto lze sledovat i jistou podobnost deformace průřezu obdélníkové úzké tyče a čtvercové trubky vzhledem k rozložení napětí a deformace, obr. 6.7a. Změna průřezu trubky bez použití vnitřní výplně a otevřeného nástroje na obr. 6.7b dle [46] je způsobena působením znázorněných sil při ohybu, které způsobují propad vnitřní a vnější stěny trubky směrem dovnitř profilu a propad bočních stěn směrem ven. Při použití uzavřeného nástroje dochází u bočních stěn profilu rovněž k propadu směrem dovnitř profilu, obr. 6.7c. Z těchto propadů stěn plyne, že u čtvercových trubek je důležitou součástí nejen vnitřní stabilizační výplň, ale také nástroj samotný (matrice, čelist, přítlačná lišta)

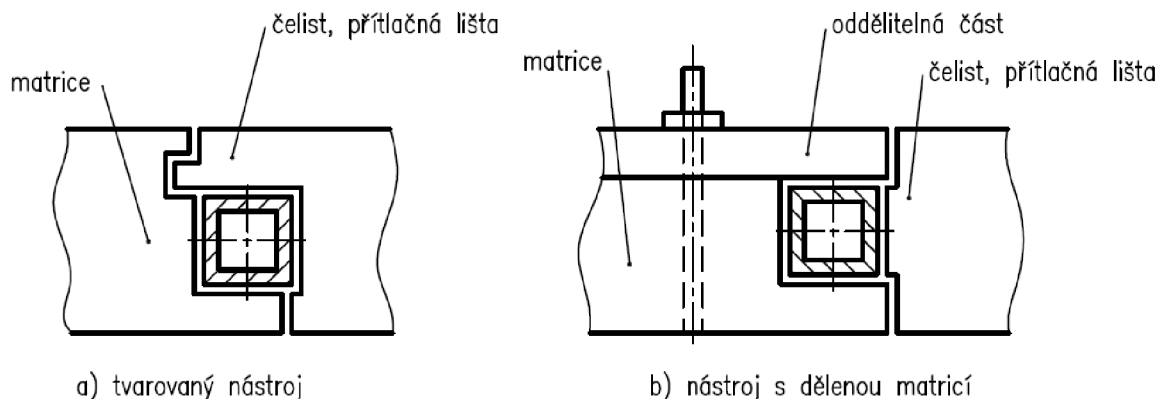
Vzhledem k deformaci čtvercového profilu a především rozšíření průřezu na vnitřní stěně ohybu, je nutné použít dělený nástroj pro snadné vkládání trubky, vedení trubky při ohybu a vytahování ohnuté součásti z nástroje.

- Nejjednodušší variantou je nástroj s tvarovanými výstupky na matrici a čelisti s přítlačnou lištou, které do sebe při uzavření zapadnou, obr.6.8a.
- Lepší způsob je uchycení tří stěn v matrici, která má horní část oddělitelnou, obr. 6.8b.

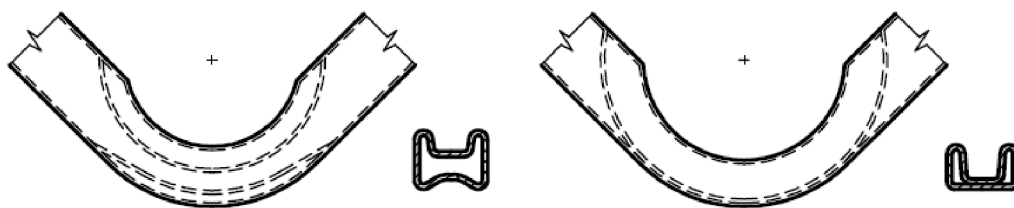


Obr. 6.7 Změny průřezu profilu [14], [31], [46]

U čtyřhranných trubek je, podobně jako u trubek kruhových (viz. „wrinkle bending“, podkapitola 3.1.1), možné cíleně kontrolovat tlakové působení na vnitřní stěně a to tvarováním trubky přes výstupky v matrici (tzv. „crush bending“, „collapse bending“) bez užití vnitřní výplně trubky. Takto jsou uměle vytvořeny a tvarově usměrněny defekty, které by vznikly při použití hladké matrice. Toto opatření umožňuje provádět náročnější (ostřejší) ohyby. Schématicky znázorněné trubky po ohybu jsou na obr. 6.9. (Pozn. tvarované matrice se s úspěchem používají i při ohybu čtyřhranných trubek pomocí beranu lisu)



Obr.6.8 Nástroje pro trubky čtvercového profilu. [42]



Obr. 6.9 Průřez trubky po ohnutí při použití tvarované matrice [46]

Vnitřní výplň je u čtvercových trubek dle [36] nutné použít téměř vždy. Dle [26] je téměř vždy nutný kuličkový trn a vyhlazovač. Trubky menších rozměrů ($h < 20$ mm) s tloušťkou stěny $t \geq 1,25$ mm mohou být ohýbány s jednodušším trnem a bez vyhlazovače při poloměru ohybu $R \geq 63$ mm a více.

Výrobci nástrojů poskytují pouze tabulky volby nástrojů, které jsou určeny pro kruhové trubky (Tabulka 1, Příloha 1) a dávají pouze doporučení jak tyto tabulky použít pro trubky čtvercového průřezu. Obecně lze říci, že ohyb čtvercových trubek považují za obtížnější než ohyb trubek kulatých a doporučují proto náročnější (preciznější) nástroje.

Obecně ohyb čtvercových trubek vyžaduje přesnější vedení trubky v nástroji a těsnější vedení trnu v trubce. Například [26] doporučuje rozměry jednotlivých částí, dle obr. 6.10 následovně:

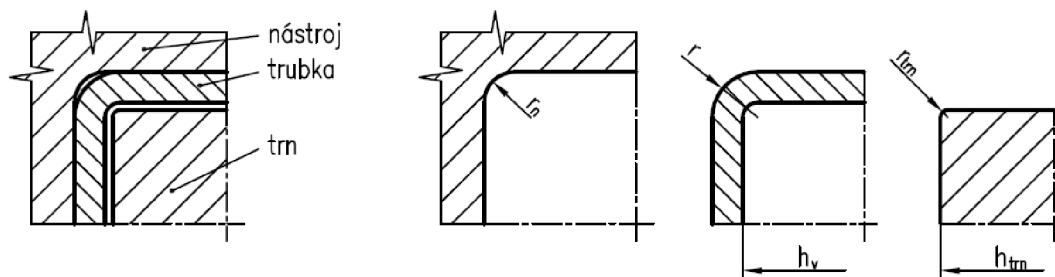
— Zaoblení nástroje $r_n \cong r + 0,40$ (30)

— Zaoblení trnu $r_{tm} \cong r - 0,40$ (31)

— Rozměr těla trnu $h_{tm,t} \geq h_v - 0,20$ (32)

— Rozměr kuličkového segmentu trnu $h_{tm,s} \geq h_v - 0,38$ (33)

kde: r – zaoblení rohu trubky
 h_v – vnitřní rozměr trubky

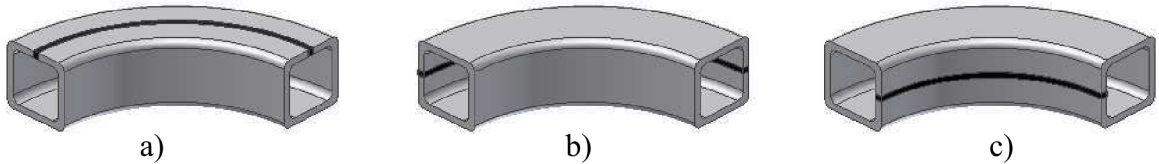


Obr. 6.10 Rozměry nástrojů pro trubky čtvercového průřezu

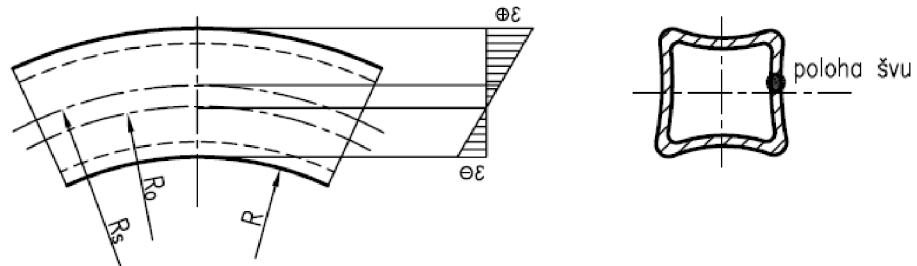
Z předchozích údajů rovněž plyne, že rozměry samotné trubky mají velký vliv na kvalitu ohybu. Tyto úchytky jsou podmíněny především metodou výroby. Čtvercové trubky jsou nejčastěji vyráběny jako svařované. Konkrétní ukázka výroby čtvercové trubky je znázorněna na fotografiích v Příloze 2. Je nutno si uvědomit, že čtvercová trubka vznikla ohybem a rohy oproti stěně vykazují určité makro-strukturální změny (např. prodloužení zrn) v případě silně zpevňujících materiálů by docházelo k výraznému rozdílu mezi mechanickými vlastnostmi oblasti rohů a stěně následkem ohybu. Nicméně vzhledem k mechanickým vlastnostem konkrétní součásti (kapitola 8) materiál nezpevňuje a dochází k makro-strukturálním změnám. Ovšem v dané práci nelze detailně posoudit do jaké míry, při zanedbání zpevnění, tato odlišná struktura ovlivní proces toku materiálu.

Důležitým faktorem při ohybu svařovaných trubek je také poloha stěny se švem vůči rovině ohybu, neboť stěna se švem má zpravidla rozdílné mechanické vlastnosti. Mohou nastat tři případy namáhání svaru a to:

- v neutrální stěně (neutrální osa ohybu), obr. 6.11a
- v tahové stěně (vnější strana ohybu), obr. 6.11b
- v tlakové stěně (vnitřní strana ohybu), obr. 6.11c



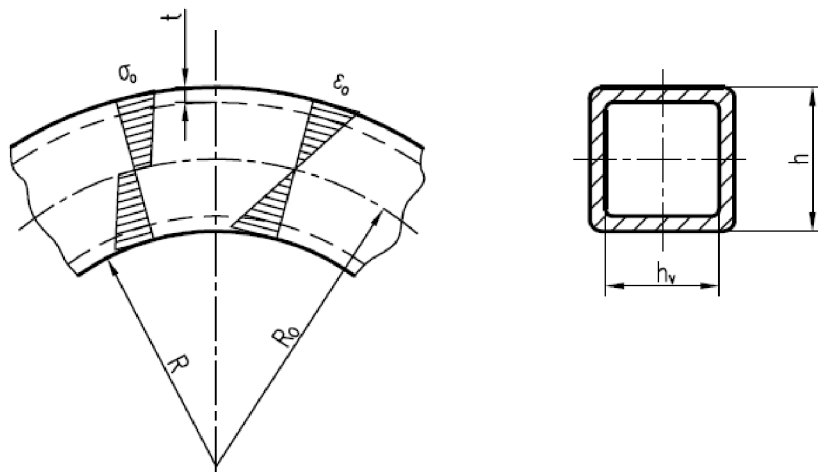
Obr. 6.11 Rozložení deformace a poloha svaru při ohybu



Obr. 6.12 Posun svarového švu vůči neutrální ose.

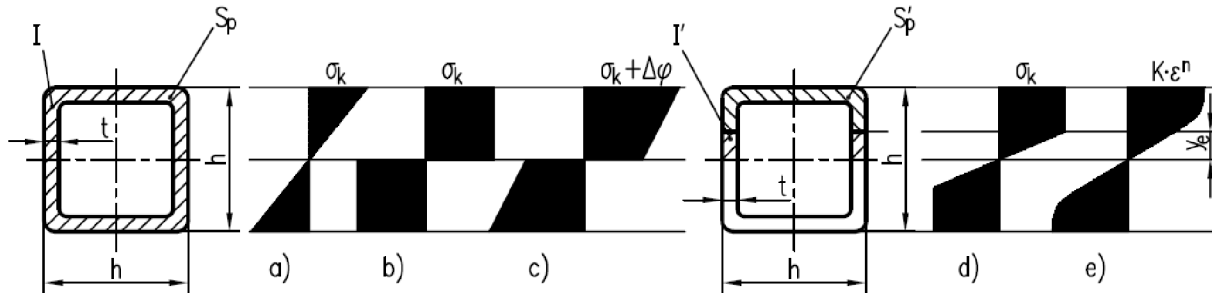
Ideální umístění svaru je do neutrální osy, ovšem pro dílce s vícenásobným ohybem v různých osách obr. 2.3 není možné umístit svar vždy do neutrální osy. Rovněž z hlediska polohy neutrální osy je nutno při technologii ohýbání rozlišovat mezi ohybem na velké poloměry (volný ohyb) a ohybem ostrým, neboť při ostrém ohybu dochází k posunu této neutrální osy směrem k vnitřnímu poloměru a svarový šev je tak namáhám tahovou silou, obr. 6.12. Z tohoto pohledu je rovněž velmi důležitá poloha svarového švu trubky ovlivněná výrobou, neboť se šev nemusí nacházet uprostřed stěny. S touto problematikou souvisí i konstrukce stabilizačních trnů, které je nutné upravit tak aby nedocházelo ke kontaktu se svarovým švem. Trn je nutné v místě svarového švu opatřit drážkou. Celkově lze konstatovat, že kvalita trubky jako polotovaru má velice významný vliv na proces ohybu a to především z pohledu dodržení stálých rozměrů a polohy svarového švu v jednotlivých šaržích.

6.3 NAPĚTÍ PŘI OHYBU A VÝPOČET OHYBOVÉHO MOMENTU [3], [25], [31]



Obr. 6.13 Průběh aproximovaného napětí a prodloužení při ohybu trubky.

Ohybový moment čtvercové trubky se určuje stejně jako ohybový moment kruhové trubky a to z obecného vztahu (16). Stejně jako jednotlivé lineární aproximace průběhu napětí, obr. 6.13, 6.14. Výpočty ohybových momentů pro jednotlivé aproximace lze vyjádřit obecněji následovně.



Obr. 6.14 Rozložení napětí a průřezové momenty pro určení ohybového momentu [3], [25]

Elastický ohybový moment, dle obr. 6.14a:

$$M_{Oa_o} = \frac{E \cdot I}{R_o} \quad (34)$$

kde: I – kvadratický moment průřezu

Ideálně tuhoplastický ohybový moment, dle obr. 6.14b:

$$M_{Ob_o} = \sigma_K \cdot S_p \quad (35)$$

kde: S_p – statický moment průřezu

Ideálně pružně plastický ohybový moment, dle obr. 6.14d:

$$M_{Od_o} = 2 \cdot \frac{E \cdot I'}{R_o} + 2 \cdot \frac{y_e \cdot E \cdot S'_p}{R_o} \quad \text{nebo} \quad M_{Ob_o} = 2 \cdot \frac{\sigma_k \cdot I'}{y_e} + 2 \cdot \sigma_k \cdot S'_p \quad (36)$$

kde: I' – kvadratický moment části průřezu

S'_p – statický moment průřezu části průřezu

y_e – vzdálenost počátku plastického napětí od neutrální roviny

Tuhoplastický ohybový moment se zpevněním, dle obr. 6.14c:

$$M_{Oc_o} = \sigma_K \cdot S_p + \frac{\bar{D}}{R_o} \cdot I \quad (37)$$

kde: \bar{D} – modul zpevnění, dle (24)

Pro případ nelineární aproximace udává [25] vztah, který vychází z rovnice (36) a uvažuje průběh napětí dle Hollomona v plastické oblasti ohybu:

$$M'_{Oe_o} = 2 \cdot \frac{E \cdot I'}{R_o} + 2 \cdot \frac{y_e^{1-n} \cdot E \cdot S'_p}{R_o} \quad (38)$$

V [25] jsou rovněž uvedeny vztahy pro výpočet ohybového momentu trubky čtvercového průřezu pomocí integrálů a s úvahou pružně–plastického ohybového napětí jehož průběh zohledňuje od meze kluzu napětí dle Hollomona, dle obr. 6.14e, tedy:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{pro } \varepsilon \leq \varepsilon_y, \quad \sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad \text{pro } \varepsilon > \varepsilon_y,$$

kde: ε_y – poměrné prodloužení na mezi kluzu

— pro případ, že $y_e \leq \frac{h}{2} - t$ je vztah po integraci ve tvaru:

$$M_{O_{e_o}} = \frac{4 \cdot t \cdot E}{3 \cdot R_0} \cdot \varepsilon_y^3 \cdot R_0^3 + \frac{4 \cdot t \cdot K}{(n+2) \cdot R_0^n} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} - t \right)^{n+2} - \left(\frac{h}{2} \cdot \varepsilon_y \right)^{n+2} \right] +$$

$$+ \frac{4 \cdot \frac{h}{2} \cdot K}{(n+2) \cdot R_0^n} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} \right)^{n+2} - \left(\frac{h}{2} - t \right)^{n+2} \right] \quad (39)$$

— pro případ, že $\frac{h}{2} - t \leq y_e \leq \frac{h}{2}$ je vztah po integraci ve tvaru:

$$M_{O_{e_o}} = \frac{4 \cdot t \cdot E}{3 \cdot R_0} \cdot \left(\frac{h}{2} - t \right)^3 + \frac{4 \cdot E \cdot \frac{h}{2}}{3 \cdot R_0} \cdot \left[R_0^3 \cdot \varepsilon_y^3 - \left(\frac{h}{2} - t \right)^3 \right] +$$

$$+ \frac{4 \cdot \frac{h}{2} \cdot K}{(n+2) \cdot R_0^n} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} \right)^{n+2} - R_0^{n+2} \cdot \varepsilon_y^{n+2} \right] \quad (40)$$

7 KONKRÉTNÍ ZKOUMANÁ SOUČÁST [39]

Zadání diplomové práce je konkretizováno na trubku čtverhranného průřezu, která je použita v konkrétní aplikaci, jako součást závěsu pátých dveří osobního automobilu systému TwinDoor. Systém TwinDoor je unikátní patentovaný systém konstrukce otevírání dvoudílných pátých dveří automobilu Škoda Superb 2. generace, která kombinuje eleganci karoserie sedan a praktické výhody karoserie liftback. Pokud do zavazadlového prostoru odkládáte drobnější předměty, stačí otevřít samotné víko kufru, obr. 7.1a. V případě, že potřebujete uložit rozměrnější náklad otevřete zadní víko včetně zadního skla a získáte tak velmi pohodlný přístup do zavazadlového prostoru, obr. 7.1b. Na obr. 7.2 je pak vidět konkrétní zkoumaná součást, ohýbaná trubka čtvercového průřezu, tohoto systému.



Obr. 7.1 Škoda Super 2. generace – zadní pohled [39]



Obr. 7.2 Detail na závěs dveří systému TwinDoor [39]

7.1 CHARAKTERISTIKA ZKOUMANÉ SOUČÁSTI [9], [31]

Jak již bylo uvedeno ohýbaná součást (obr. 7.3a) je součástí výrobní sestavy závěsu pátých dveří (obr. 7.3d) vyráběné firmou Edscha Automotive Kamenice s.r.o. Jako polotovar je použita svařovaná čtvercová trubka o vnějším rozměru $h = 20 \text{ mm}$ a tloušťce stěny $t = 2 \text{ mm}$ a řídí se dle ČSN EN 10305-5 [9]. Označení materiálu polotovaru ocelové svařované trubky je E190 +CR2, číslo materiálu je 1.0031. Tabulka 9 uvádí chemické složení tavebního vzorku oceli, mechanické a technologické vlastnosti oceli.

Tabulka 9 Materiálové hodnoty svařované ocelové trubky E 190, [9]

OCEL + CR2 ¹⁾		Chemické složení max.[hm.-%] - tavební vzorek					Mechanické vlastnosti min. ²⁾		
značka	číslo	C	Si	Mn	P	S	ReH	Rm	A
E 190	1.0031	0,10	0,55	0,70	0,025	0,025	190 MPa	270 MPa	26%

Technologické údaje:

- vhodná ke svařování

Použití:

- méně namáhané potrubí

Poznámky:

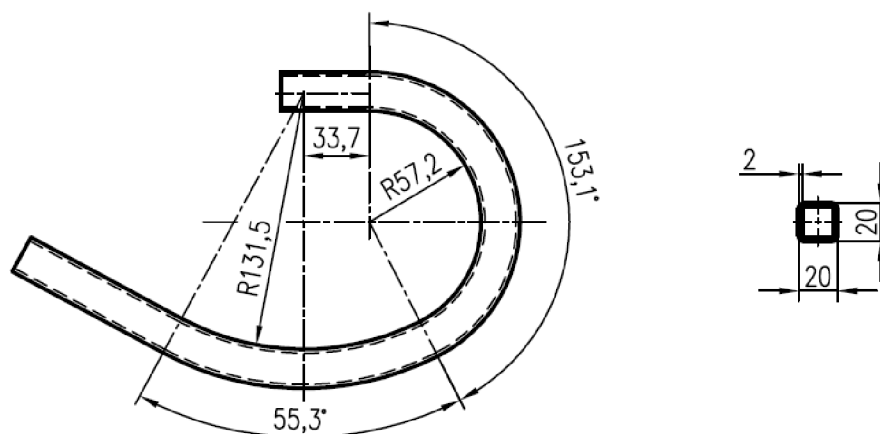
1) + CR2 - tepelně nezpracovaný

2) mechanické a technologické vlastnosti materiálu v oblasti svaru mohou být odlišné od základního materiálu



Obr. 7.3 Postup výroby závěsu pátých dveří [31]

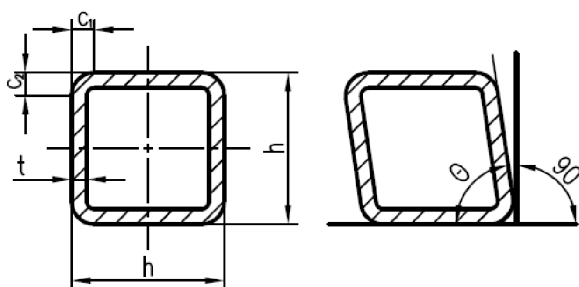
Tato součást se skládá ze dvou tangenciálně na sebe navazujících poloměrů R131,5 a R57,2. Svarový šev je umístěn do neutrální osy ohybu v horní stěně trubky. Schématicky znázorněná součást včetně nejdůležitějších rozměrů je na obr. 7.4. Důležité výřezy z výrobního výkresu součásti pak v Příloze 3 (kompletní výrobní výkres součásti v měřítku není zveřejněn vzhledem k požadavkům firmy). Tolerance polotovaru trubky dané ČSN EN 10305-5 [9] jsou pro tuto konkrétní součást uvedeny v Tabulce 10.



Obr. 7.4 Schématicky znázorněná součást

Tabulka 10 Tolerance trubky čtvercového průřezu o rozměru 20x2 [9]

čtvercová trubka 20x2 mm	
rozměr	tolerance
h	± 0,20
t	± 0,20
c ₁ , c ₂	≤ 3mm
90°-θ	± 1°



Tolerance polohy svarového švu je ± 2 mm od středu stěny.

7.2 VÝPOČET TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ OHYBU

Konkrétní hodnoty technologických parametrů zadané součásti udávají následující vztahy:

— relativní tloušťka stěny

$$\frac{t}{h} = \frac{2}{20} = \frac{1}{10} = 0,1 \quad (41)$$

— relativní poloměr ohybu pro R131,5

$$\frac{R}{h} = \frac{131,5}{20} = 6,575 \quad (42)$$

— relativní poloměr ohybu pro R57,2

$$\frac{R}{h} = \frac{57,2}{20} = 2,860 \quad (43)$$

— poloměr zaoblení rohů je dán ČSN EN 10305-5 [44]

$$r \leq 3 \text{ mm} \quad (44)$$

7.3 OHÝBACÍ ZAŘÍZENÍ A NÁSTROJE

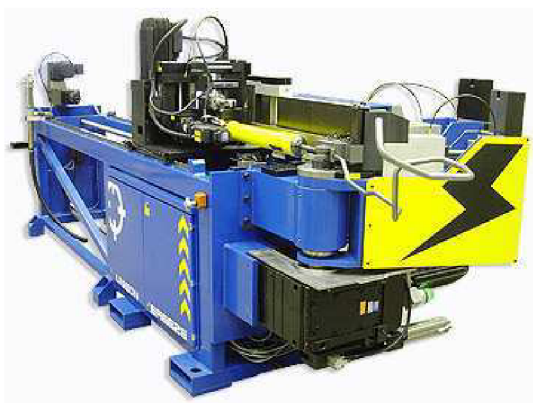
Součást je ohýbána pomocí zařízení od společnosti Unison s označením Unison MG2790, obr. 7.5. Toto zařízení umožňuje provádět tři různé způsoby ohybu:

- ohyb pomocí nabalování kladkou
- ohyb navíjením přes matici
- ohyb osovou tlakovou silou

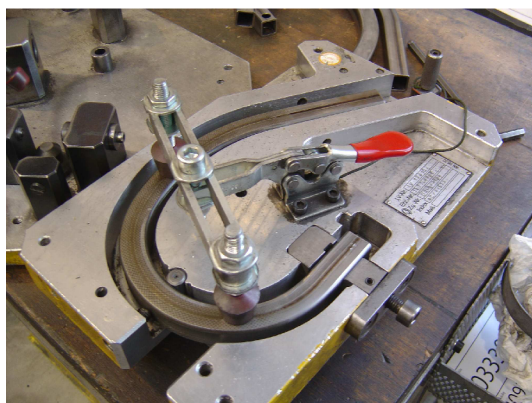
Poslední dva způsoby ohybu je možné mezi sebou kombinovat a využít tak výhod obou procesů, viz. podkapitola 2.1.3.

Ohýbaná součást je vyráběna na jedno upnutí a to tak, že po vložení součásti do ohýbacího zařízení dojde nejprve k vytvoření většího poloměru ohybu R131,5. Osovou tlakovou silou je součást tlačena a pomocí pohyblivé kladky ohnuta na požadovaný poloměr ohybu R131,5, na obr. 7.7 se jedná o spodní část nástroje. Po provedení ohybu dojde k přesunu trubky do horní části nástroje a pomocí navíjení s přidavnou tlakovou silou je proveden ohyb na poloměr R57,2, horní část nástroje na obr. 7.7.

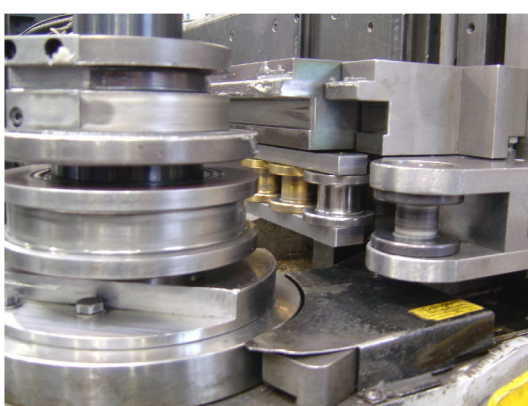
Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně obtížný ostrý ohyb je zde aplikována přidavná tlaková síla a také je použit uzavřený tvarovaný nástroj, který neumožňuje propad bočních stěn směrem ven.



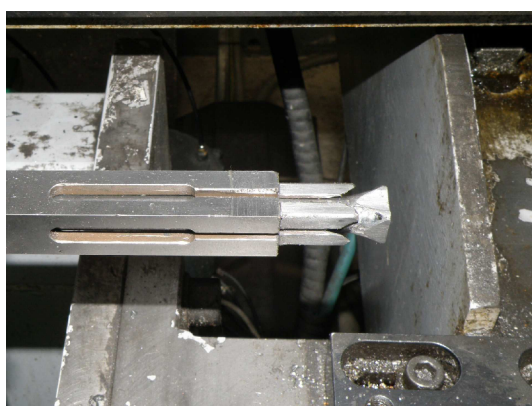
Obr. 7.5 Ilustrační foto ohýbačky Unison [44]



Obr. 7.6 Přípravek na kontrolu rozměrů



Obr. 7.7 Detail nástroje ohýbačky



Obr. 7.8 Detail používaného trnu pro R57,2

Na obr. 7.8 je detail jednoduchého trnu používaného při ohybu, ovšem vzhledem k jeho parametrům lze předpokládat jeho nedostatečnou funkci. Na konci celého procesu jsou trubky pravidelně kontrovány pomocí jednoduchého přípravku, obr. 7.6.

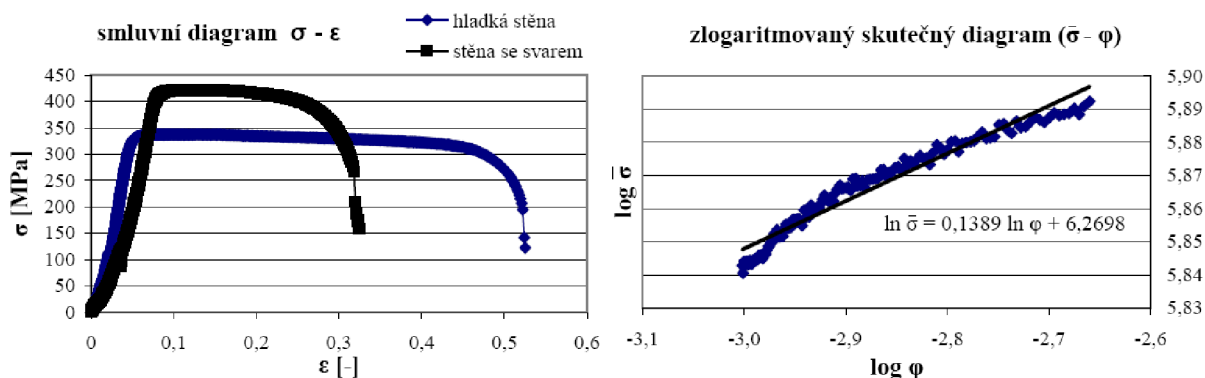
7.4 TAHOVÁ ZKOUŠKA A MECHANICKÉ VLASTNOSTI TRUBKY [2], [38]

Z provedených tahových zkoušek, jejichž průběh znázorňuje graf 3, byly získány hodnoty mechanických vlastností čtvercové trubky. Tabulka 11 udává mechanické vlastnosti hladké stěny a mechanické hodnoty stěny se svarem.

Z průběhu křivek porovnávajících hladkou stěnu a stěnu se svarem vyplývá, že stěna se svarem má vyšší hodnotu meze pevnosti a nižší tažnost. Pro trubku s poloměrem ohybu R57,2 je maximální teoretická hodnota osového přetvoření vyjádřena dle vztahu (8) $\varepsilon_{t(1)} = 14,9\%$. Z uvedeného plyne, že materiál má teoreticky dostatek „plastičnosti“ a to i v případě, že by stěna se svarovým švem byla umístěna do tahové oblasti.

Tabulka 11 Mechanické vlastnosti materiálu z tahové zkoušky

Mechanické vlastnosti hladké stěny			Mechanické vlastnosti stěny se svarem		
R _{p0,2}	R _m	A ₅	R _{p0,2}	R _m	A ₅
329,5 MPa	342,9 MPa	33%	418,3 MPa	424,8 MPa	21%



Graf 3 Průběh tahové zkoušky

Graf 4 Exponent zpevnění a materiálová konstanta

Z průběhu tahové zkoušky lze předpokládat, že zpevnění materiálu je nepodstatné, což dokládá i malý rozdíl mezi hodnotou meze kluzu a meze pevnosti. Tento předpoklad potvrdila hodnota exponentu deformačního zpevnění (45), která byla stanovena dle [38] z naměřených hodnot tahové zkoušky spolu s materiálovou konstantou K (46):

$$n = 0,14 \quad (45)$$

$$K = 528,4 \text{ MPa} \quad (46)$$

Z těchto získaných hodnot je pak možné dle (21) stanovit modul zpevnění \bar{D} :

$$\bar{D} = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{2}{1+0,14} \cdot 528,4 \cdot 0,14^{0,14} \cong 704 \text{ MPa} \quad (47)$$

7.5 MATERIÁLOVÉ MODELY A VÝPOČET OHYBOVÉHO MOMENTU

Pro vhodnou volbu materiálového modelu a výpočet ohybového momentu jsou důležité skutečné mechanické vlastnosti materiálu trubky, které byly získány pomocí tahové zkoušky a byly popsány v předcházející podkapitole. Pro výpočet samotného ohybového momentu jsou důležité hodnoty průřezových charakteristik čtvercové průřezu.

Statický moment průřezu:

$$S_p = \frac{h^3}{4} - \frac{(h-2 \cdot t)^3}{4} = \frac{20^3}{4} - \frac{(20-2 \cdot 2)^3}{4} = 976 \text{ mm}^3 \quad (48)$$

Kvadratický moment průřezu:

$$I = \frac{h^4}{12} - \frac{(h-2 \cdot t)^4}{12} = \frac{20^4}{12} - \frac{(20-2 \cdot 2)^4}{12} = 7872 \text{ mm}^4 \quad (49)$$

7.5.1 Materiálové modely a výpočet ohybového momentu pro R57,2 [3], [9], [25], [31]

V případě poloměru ohybu $R=57,2$ mm se jedná o ohyb jasně ostrý. Tomuto případu odpovídají následující lineární aproximace ohybového napětí:

- ideálně tuhoplastický stav, obr. 6.14b
- tuhoplastický stav se zpevněním, obr. 6.14c

Pro porovnání je uvažována i nelineární aproximace s průběhem napětí dle Hollomona v plastické oblasti ohybu, obr. 6.14e.

Ohybový moment pro ideálně tuhoplastický materiálový model:

$$M_{ob_o} = \sigma_K \cdot S_p = 329,52 \cdot 976 \cong 321,6 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (50)$$

Ohybový moment pro tuhoplastický materiálový model se zpevněním:

$$M_{O_{e_o}} = \sigma_K \cdot S_p + \frac{\bar{D}}{R_o} \cdot I = 329,52 \cdot 976 + \frac{704}{67,2} \cdot 7872 \cong 404,1 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (51)$$

Ohybový moment pro pružně-plastický materiálový model s průběhem dle Hollomona v plastické oblasti:

$$\begin{aligned} M_{O_{e_o}} &= \frac{4 \cdot t \cdot E}{3 \cdot R_o} \cdot \varepsilon_y^3 \cdot R_o^3 + \frac{4 \cdot t \cdot K}{(n+2) \cdot R_o^n} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} - t \right)^{n+2} - \left(\frac{h}{2} \cdot \varepsilon_y \right)^{n+2} \right] + \\ &+ \frac{4 \cdot \frac{h}{2} \cdot K}{(n+2) \cdot R_o^n} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} \right)^{n+2} - \left(\frac{h}{2} - t \right)^{n+2} \right] = \frac{4 \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{3 \cdot 67,2} \cdot 0,002^3 \cdot 67,2^3 + \\ &+ \frac{4 \cdot 2 \cdot 528,4}{(0,14+2) \cdot 67,2^{0,14}} \cdot \left[\left(\frac{20}{2} - 2 \right)^{0,14+2} - \left(\frac{20}{2} \cdot 0,002 \right)^{0,14+2} \right] + \\ &+ \frac{4 \cdot \frac{20}{2} \cdot 528,4}{(0,14+2) \cdot 67,2^{0,14}} \cdot \left[\left(\frac{20}{2} \right)^{0,14+2} - \left(\frac{20}{2} - 2 \right)^{0,14+2} \right] \cong 385,2 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (52) \end{aligned}$$

Dle výsledků vypočítaných ohybových momentů je vidět, že materiálový model s lineárním zpevněním (51) navyšuje ohybový moment (50) o 25%. Nicméně vzhledem k tomu, že materiál E190 +CR2 vykazuje exponent zpevnění pouze $n = 0,14$ je možné tento vliv zanedbat. Rozdíl mezi jednoduchým výpočtem ohybového momentu (50) a složitým výpočtem (52) činí 19%.

Z těchto poznatků lze konstatovat, že výpočet ohybového momentu pro poloměr ohybu R57,2 je možné počítat pomocí jednoduchého vztahu (50), který uvažuje ideálně tuhoplastický materiálový model.

7.5.2 Materiálové modely a výpočet ohybového momentu pro R131,5 [3], [25], [31]

V případě poloměru ohybu $R=131,5$ mm se jedná o ohyb na rozhraní mezi ostrým a volným. Těmto případům odpovídají následující lineární aproximace ohybového napětí:

- pružně – plastický stav, obr. 6.14d
- ideálně tuhoplastický stav, obr. 6.14b
- tuhoplastický stav se zpevněním, obr. 6.14c

Pro porovnání je opět uvažována i nelineární aproximace s průběhem napětí dle Hollomona v plastické oblasti ohybu, obr. 6.14e.

Při rozvinutějších plastických deformacích se uvažuje lineární průběh napětí až do meze kluzu, dle Hookova zákona $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Za smluvní mez kluzu je dle experimentu uvažována hodnota napětí σ_k při poměrném prodloužení $\varepsilon = 0,002$, této hodnotě odpovídá dle (8) polovina tloušťky střední vrstvy:

$$y_e = 0,002 \cdot R_o = 0,002 \cdot (131,5 + 10) = 0,283 \text{ mm} \quad (53)$$

Celková hodnota tloušťky střední vrstvy pak je 0,566 mm, což odpovídá přibližně 3% celkové výšky profilu. Výpočet pružně – plastického ohybového momentu vyžaduje složité

určení průřezových charakteristik. Ovšem vzhledem k tomu, že se v tomto případě jedná o malou oblast lze pružnou oblast zanedbat a uvažovat tuhoplastický stav.

Ohybový moment pro ideálně tuhoplastický materiálový model:

$$M_{Ob_o} = \sigma_K \cdot S_p = 329,52 \cdot 976 \cong 321,6 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (54)$$

Ohybový moment pro tuhoplastický materiálový model se zpevněním:

$$M_{Oc_o} = \sigma_K \cdot S_p + \frac{\bar{D}}{R_o} \cdot I = 329,52 \cdot 976 + \frac{704}{141,5} \cdot 7872 \cong 360,8 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (55)$$

Ohybový moment pro pružně-plastický materiálový model s průběhem dle Hollomona v plastické oblasti:

$$\begin{aligned} M_{Oe_o} &= \frac{4 \cdot t \cdot E}{3 \cdot R_o} \cdot \varepsilon_y^3 \cdot R_o^3 + \frac{4 \cdot t \cdot K}{(n+2) \cdot R_o^n} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} - t \right)^{n+2} - \left(\frac{h}{2} \cdot \varepsilon_y \right)^{n+2} \right] + \\ &+ \frac{4 \cdot \frac{h}{2} \cdot K}{(n+2) \cdot R_o^n} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} \right)^{n+2} - \left(\frac{h}{2} - t \right)^{n+2} \right] = \frac{4 \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{3 \cdot 141,5} \cdot 0,002^3 \cdot 141,5^3 + \\ &+ \frac{4 \cdot 2 \cdot 528,4}{(0,14+2) \cdot 141,5^{0,14}} \cdot \left[\left(\frac{20}{2} - 2 \right)^{0,14+2} - \left(\frac{20}{2} \cdot 0,002 \right)^{0,14+2} \right] + \\ &+ \frac{4 \cdot \frac{20}{2} \cdot 528,4}{(0,14+2) \cdot 141,5^{0,14}} \cdot \left[\left(\frac{20}{2} \right)^{0,14+2} - \left(\frac{20}{2} - 2 \right)^{0,14+2} \right] \cong 343,4 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (56) \end{aligned}$$

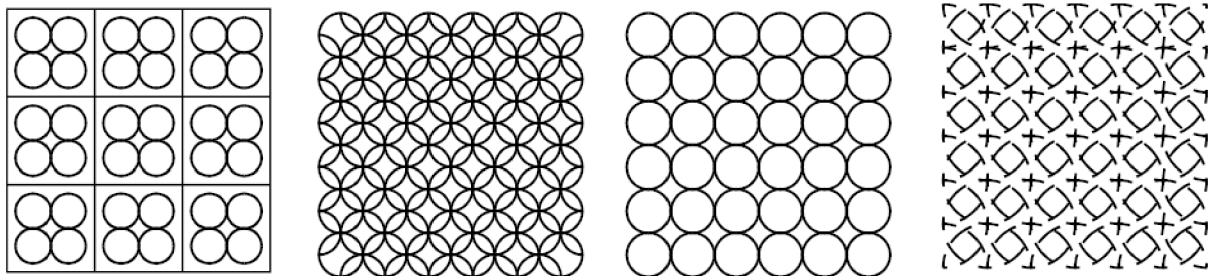
V tomto případě je rozdíl mezi (54) a (55) o polovinu nižší než v předchozím případě, vzhledem k volnějším ohybu, a činí 12%. Ovšem stejně jako u předchozího poloměru, je vzhledem k exponentu zpevnění možné tento vliv zanedbat. Rozdíl mezi (54) a (56) je rovněž nižší a činí necelých 7%. Z předchozích údajů vyplývá, že i pro výpočet ohybového momentu tohoto poloměru ohybu je možné využít jednoduchý vztah (54) uvažující ideálně tuhoplastický materiálový model.

8 VLASTNÍ EXPERIMENT, MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

Některá základní měření a vyhodnocení zadané součásti jsou částečně uvedeny v diplomové práci [24]. Ovšem k detailnějšímu zkoumání a měření byly provedeny nové ohyby a experimenty, které jsou blíže popsány v této kapitole.

8.1 METODA DEFORMAČNÍ SÍTĚ [14], [34], [40]

Tato metoda slouží obecně ke studiu plastických deformací a je založena na pozorování makroskopických přetvoření plošných prvků. Metoda dává kromě kvantitativních hodnocení také názornou představu o toku materiálu či ohnisku plastického přetvoření. Deformační síť se nanáší pomocí různých metod a záleží na účelu a okolnostech, podle kterých je metoda nanášení zvolena. Mezi prakticky používané metody patří: potiskování, rytí, fotografická metoda, chemické leptání, elektrolytické leptání a vyjiskřování. Z hlediska tvarů jsou nejčastěji používány kruhové a čtvercové elementy popřípadě jejich kombinace, ale možné jsou i další varianty, obr. 8.1.



Obr. 8.1 Příklady deformačních sítí [34]

V konkrétním případě bylo využito dostupné školní zařízení, obr. 8.2, které je založeno na principu elektrolytického leptání jehož výhody lze shrnout do následujících několika bodů:

- deformační síť neovlivňuje tření mezi nástrojem a polotovarem
- nenarušuje povrch součásti a nedochází tak ke vzniku vrubového účinku, jako je to možné u mechanického nanášení sítě
- dobrá odolnost sítě proti nepříznivým jevům během tváření (velké přetvoření, otěr, maziva, atd.) a následná dobrá čitelnost sítě
- rozměrová a tvarová přesnost sítě v závislosti na zvoleném parametru
- jednoduchost a malá pracnost nanášení sítě

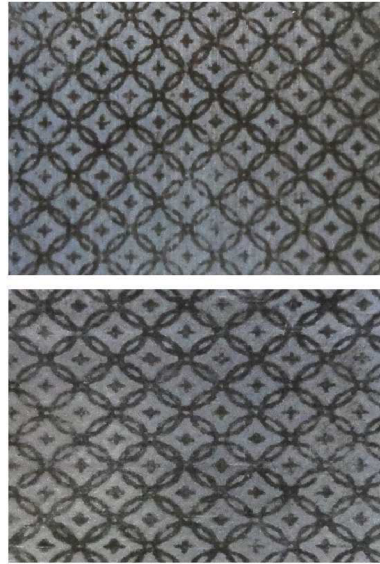
Zařízení bylo nastaveno podle poznatků [40] a bylo tak provedeno úspěšné nanášení deformační sítě. Detail nanášeného vzorku na stěně trubky je vyobrazen na obr. 8.4.



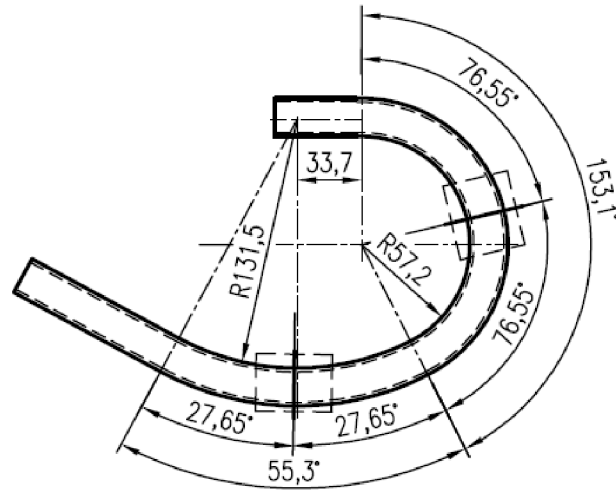
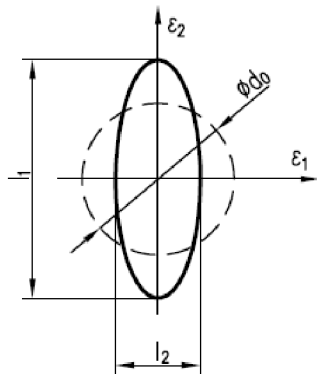
Obr. 8.2 Pracoviště elektrolytického nanášení sítě [40]

Polotovary s nanesenou sítí byly ohnuty na stejném zařízení a za stejných podmínek jako běžně vyráběné součásti.

Vyhodnocení deformované sítě bylo provedeno pomocí dílenského mikroskopu Carl Zeiss Jena 11553, obr. 8.3. Pro umožnění měření a upnutí součásti bylo provedeno vyříznutí částí trubky z oblastí vrcholů jednotlivých poloměrů ohybu, jak znázorňuje obr. 8.6 a 8.10.



Obr. 8.3 Dílenský mikroskop Carl Zeiss Jena Obr. 8.4 Nanesená síť původní a deformovaná



Obr. 8.5 Deformace kružnice na elipsu Obr. 8.6 Místa výřezů jednotlivých poloměrů

Analýza spočívá na základě proměření deformované sítě kružnic, kdy původní kružnice o ϕd_0 se přemění na elipsu, jejíchž osy udávají směr a velikost hlavních deformací, obr. 8.5. Výpočet v jednotlivých bodech je pak možné provést následovně:

— Poměrná přetvoření v jednotlivých osách:

$$\epsilon_1 = \frac{l_1 - d_0}{d_0} \tag{57}$$

$$\epsilon_2 = \frac{l_2 - d_0}{d_0} \tag{58}$$

— Přepočítání na skutečná logaritmická přetvoření:

$$\varphi_1 = \ln(1 + \varepsilon_1) \quad (59)$$

$$\varphi_2 = \ln(1 + \varepsilon_2) \quad (60)$$

— Výpočet přetvoření φ_3 ze zákona konstantního objemu:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_3 \quad (61)$$

Jsou-li známa jednotlivá přetvoření, pak východiskem teoretické analýzy stavu napjatosti jsou Lévy-Misesovy rovnice viz. [14], [40]. Pro rovinnou napjatost (pokud by se v tomto případě připustila), kdy uvažujeme $\sigma_3 = 0$, platí rovnice efektivního přetvoření ve sledovaném bodě:

$$\varphi_{ef} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2} \quad (62)$$

Porovnáním Mohrových kružnic napětí a přetvoření a při využití zákona konstantního objemu, pak platí:

$$\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\varphi_1 - \varphi_3} = \frac{2 \cdot \varphi_2 + \varphi_1}{2 \cdot \varphi_1 + \varphi_2} \quad (63)$$

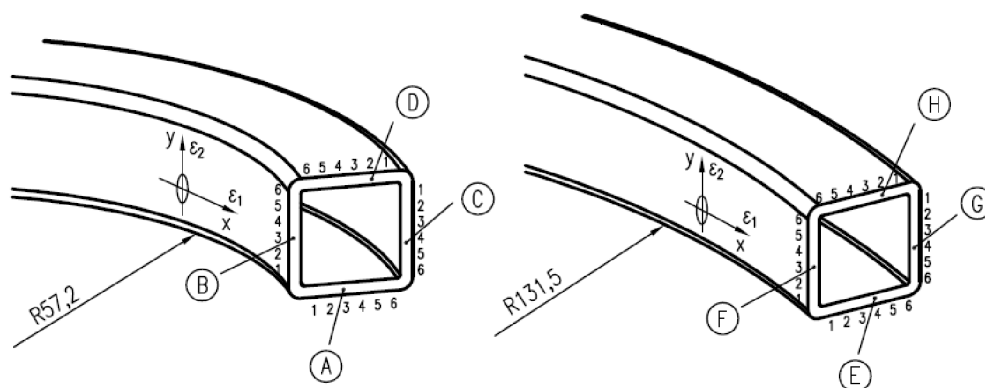
Pro rovinnou napjatost, kdy $\sigma_3 = 0$, je možné stanovit poměr napětí:

$$\alpha' = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{2 \cdot \varphi_2 + \varphi_1}{2 \cdot \varphi_1 + \varphi_2} \quad (64)$$

kde: α' – poměr napětí označovaný jako materiálový koeficient

Měření bylo provedeno ve všech stěnách vyříznutých vzorků trubky, viz. obr. 8.6 a 8.10. Každý prvek deformační sítě byl proměřen třikrát a pro navazující výpočty jsou uvažovány aritmetické průměry takto naměřených dat. Metodika následných propočtů uvedených výše byla provedena dle [14], [40] a vypočítané hodnoty jsou uveřejněny přehledně v tabulkách dále.

Pozn. rozdíl mezi kolmým (měřeným) průmětem deformovaného elementu a jeho obloukovou (skutečnou) délkou, který je dán deformací průřezu během ohybu, je v případě maximální deformace na vnější stěně ohybu v řádech tisíců mm. Rovněž tak rozdíl mezi kolmým průmětem a délkou oblouku danou poloměrem ohybu součásti. Z tohoto důvodu je možné v rámci zjednodušení rozdíl zanedbat a uvažovat tak kolmé průměty.

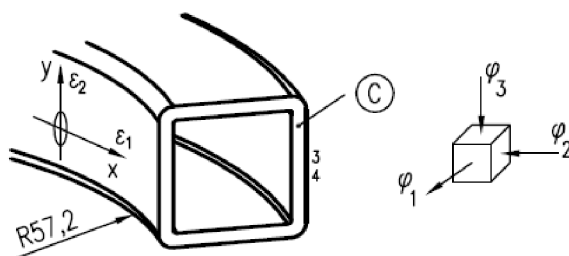


Obr. 8.7 Označení jednotlivých stěn a míst měření

Jednotlivé stěny z výřezů trubky jsou označeny velkými písmeny $A \div H$ a jednotlivá místa měření pak číselným označením. Podélný směr stěny trubky je označen jako x (směr deformace ε_1) a příčný směr jako y (směr deformace ε_2). Výše uvedené označení je přehledně znázorněno na obr. 8.7.

Pozn. je nutné poznamenat, že jednotlivé místa měření nejsou symetrická vůči podélnému ani příčnému směru, neboť vzhledem k technice nanášení deformační sítě není možné zaručit polohy jednotlivých elementů. Jinak řečeno například bod C1 není stejně vzdálený od horní stěny, jako bod B6, dle obr. 8.7. A také bod C1 není ve stejné vzdálenosti od horní stěny jako bod C6 od spodní stěny, dle obr.8.7.

Nejvíce namáhanou stěnou během ohybu je stěna C, tedy vnější stěna ostrého poloměru ohybu $R57,2$ namáhaná tahem. Tabulka 12 znázorňuje vypočítané hodnoty jednotlivých přetvoření této stěny. Pro rozvoj trhlin jsou nejdůležitější hodnoty přetvoření v místě 3 a 4 uprostřed stěny, které vykazují i přibližně stejné hodnoty. Dle deformačního charakteru elips φ_1 a φ_2 je zřejmé, že v tomto místě dochází ke ztenčování stěny tomu odpovídá schéma deformace znázorněné na obr. 8.8.



Obr. 8.8 Nejvíce namáhaná stěna C a její schéma deformace

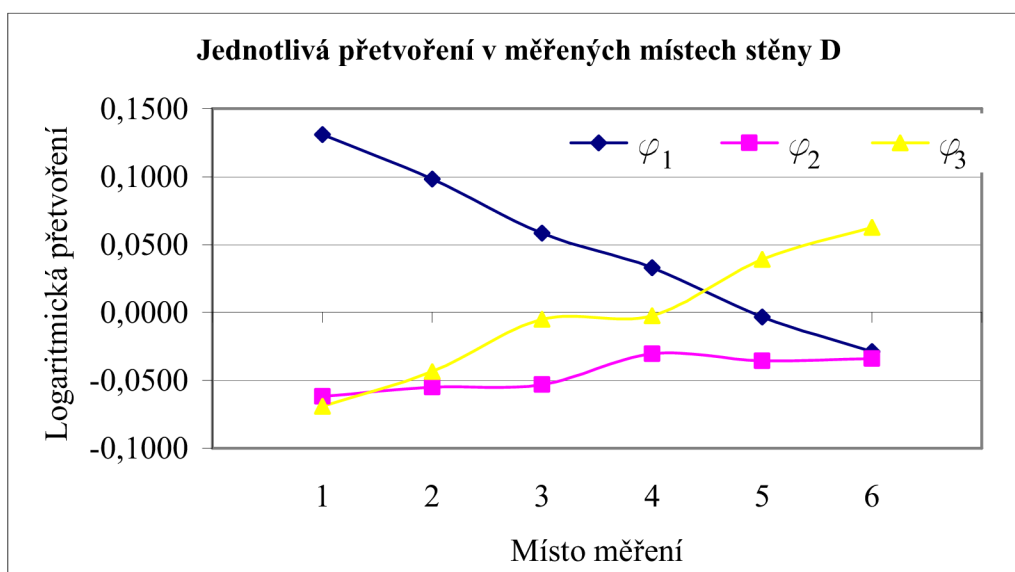
Tabulka 12 Hodnoty jednotlivých přetvoření stěny C

C místo	x		y		φ_3	φ_{ef}	α
	ε_1	φ_1	ε_2	φ_2			
1	0,1550	0,1441	-0,0917	-0,0961	-0,0479	0,1467	-0,2511
2	0,1783	0,1641	-0,0833	-0,0870	-0,0770	0,1642	-0,0415
3	0,1817	0,1669	-0,1033	-0,1092	-0,0577	0,1695	-0,2290
4	0,1800	0,1655	-0,1133	-0,1204	-0,0451	0,1711	-0,3573
5	0,1767	0,1627	-0,1300	-0,1393	-0,0234	0,1759	-0,6227
6	0,1800	0,1655	-0,1317	-0,1412	-0,0243	0,1787	-0,6160

Vypočítaná hodnota $\varphi_{ef} = 17\%$ dokazuje, že hodnota poměrného přetvoření činí $\varepsilon_{ef} \cong 18,5\%$ tudíž se jedná o ohyb s dostatečnou zásobou tvařitelnosti z hlediska vzniku trhlin, za předpokladu $\varepsilon_T \cong A$. Poněvadž poměrné přetvoření (tažnost) v okamžiku vzniku poruchy při tahové zkoušce bylo 33%, viz. Tabulka 11. Na grafu 3 je vidět, že toto přetvoření je přibližně v polovině smluvního diagramu v dostatečné vzdálenosti od tvárného lomu. Pomocí materiálového koeficientu α a znalosti kompletního diagramu skutečného napětí tj. $\sigma_{ef} = f(\varphi_{ef})$ by bylo možné určit, například dle [40], hodnoty hlavních napětí σ_1, σ_2 .

Tabulka 13 Hodnoty jednotlivých přetvoření stěny D

D místo	x		y		φ_3	φ_{ef}
	ε_1	φ_1	ε_2	φ_2		
1	0,1400	0,1310	-0,0600	-0,0619	-0,0692	0,1311
2	0,1033	0,0983	-0,0533	-0,0548	-0,0435	0,0986
3	0,0600	0,0583	-0,0517	-0,0531	-0,0052	0,0645
4	0,0333	0,0328	-0,0300	-0,0305	-0,0023	0,0366
5	-0,0033	-0,0033	-0,0350	-0,0357	0,0390	0,0432
6	-0,0283	-0,0288	-0,0333	-0,0339	0,0627	0,0627



Graf 5 Jednotlivá přetvoření v měřených místech stěny D

Tabulka 13 horní stěny D ukazuje, jak se v této stěně mění jednotlivé složky deformace resp. schéma deformace. Na grafu 5 jsou pak názorně vidět změny jednotlivých přetvoření, kdy například žlutě znázorněné přetvoření φ_3 udává postupnou změnu tloušťky stěny od největšího zeslabení na vnější straně ohybu až po největší zesílení na vnitřní straně ohybu.

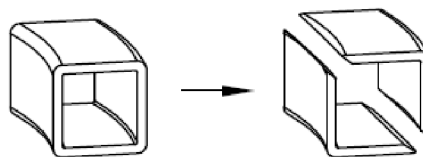
Tabulky s naměřenými hodnotami a propočty všech stěn jsou kompletně uvedeny v Příloze 4.

8.2 MĚŘENÍ TLOUŠŤKY STĚN A POSUNUTÍ TĚŽIŠTĚ PRŮŘEZU [14], [27], [40]

Měření tloušťky jednotlivých stěn bylo provedeno na stejných výřezech a místech trubky, jako měření deformační sítě. Tyto výřezy byly podélně rozříznuty v oblasti rohů aby bylo umožněno jejich proměření, obr. 8.10. Samotné měření pak bylo provedeno pomocí digitálního třmenového hrotového mikrometru Mitutoyo Digimatic 342-261, obr. 8.9.

Každý prvek byl proměřen šestkrát a byl určen jeho aritmetický průměr. Jednotlivé stěny trubky jsou označeny stejně jako v předešlém případě deformační sítě, obr. 8.7. Naměřené hodnoty byly porovnány s hodnotami získanými pomocí deformační sítě, kdy pomocí hodnoty přetvoření φ_3 , určené ze zákona konstantního objemu (61), byla zpětně určena tloušťka stěny:

$$\varphi_3 = -\ln \frac{t}{t_0} \Rightarrow t \quad (65)$$



Obr. 8.9 Mikrometr Mitutoyo Digimatic 342 [27] Obr. 8.10 Upravené výřezy trubky

Porovnání takto zjištěných tloušťek je v Tabulce 14 a Tabulce 15. Na příkladu stěny A jsou pomocí grafu 6 znázorněny a zdůvodněny odlišnosti. Z průběhů grafu je vidět, že charakter obou křivek je přibližně stejný a dokládá tak důvěryhodnost měření. Rozdíl mezi jednotlivými hodnotami spočívá především v tom, že do výpočtu tloušťky stěny pomocí deformační sítě je uvažována teoreticky přesná hodnota ($t_0 = 2$ mm). Na rozdíl od skutečné tloušťky stěny, která je ovlivněna mnoha faktory z výroby a prokazuje tak určité úchytky. Největší odchylku ze všech měřených stěn, vykazují hodnoty v místech 5, 6 měřené mikrometrem a jsou způsobeny rozdílnou tloušťkou stěny. Tuto lokální změnu tloušťky stěny trubky ukazují obr. 8.12.

Tabulka 14 tloušťky stěn v jednotlivých místech měření na poloměru R57,2

Místo měření	Místo na stěně trubky							
	A		B		C		D	
	m	e	m	e	m	e	m	e
1	2,0293	2,1122	2,3103	2,2435	1,9433	1,9065	2,0430	1,8664
2	1,9777	2,0792	2,2242	2,2886	1,8595	1,8517	2,0662	1,9149
3	1,9715	2,0891	2,2177	2,2980	1,8527	1,8882	(svar)	1,9897
4	1,9445	1,9895	2,2113	2,2604	1,8460	1,9119	(svar)	1,9955
5	1,9813	1,9374	2,2346	2,2574	1,8453	1,9538	2,1538	2,0796
6	2,0055	1,8072	2,2615	2,2824	1,8970	1,9522	2,2026	2,1294

m - měřeno pomocí mikrometru

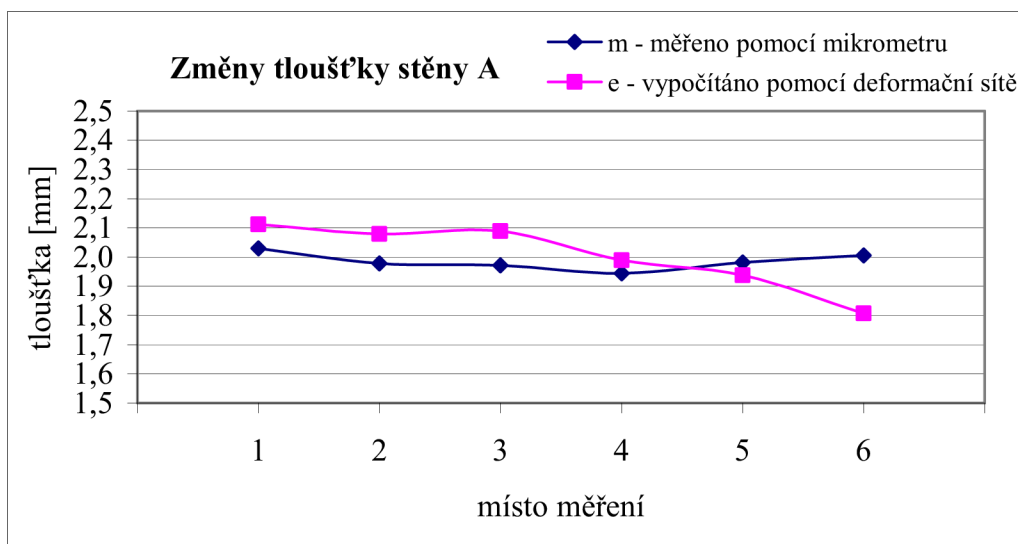
e - vypočítáno pomocí deformační sítě ze zákona konstantního objemu

Tabulka 15 tloušťky stěn v jednotlivých bodech měření na poloměru R131,5

Místo měření	Místo na stěně trubky							
	E		F		G		H	
	m	e	m	e	m	e	m	e
1	2,0138	2,0186	2,2135	2,1131	2,0415	1,9826	2,1032	1,9374
2	1,9705	2,0241	2,1307	2,1293	1,9860	1,9712	2,1100	1,9855
3	1,9778	2,0255	2,1931	2,2011	1,9703	1,8827	(svar)	1,9463
4	1,9727	2,0051	2,1872	2,1955	1,9643	1,9078	(svar)	1,9510
5	1,9817	1,9913	2,1533	2,1377	1,9767	1,8941	2,1360	2,0772
6	2,0575	1,9758	2,1653	2,1711	2,0128	1,9285	2,1727	2,0160

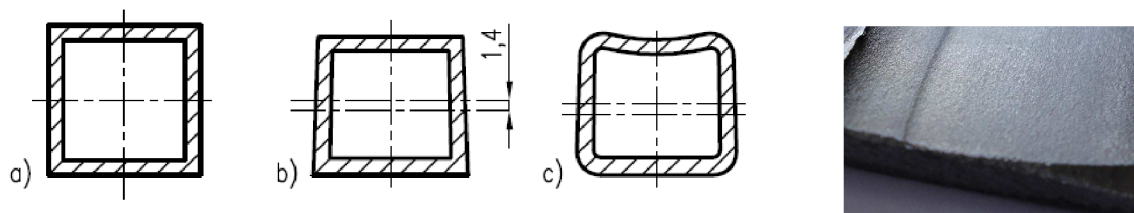
m - měřeno pomocí mikrometru

e - vypočítáno pomocí deformační sítě ze zákona konstantního objemu



Graf 6 Změny tloušťky stěny A

Zároveň byl zohledněn fakt, že distorze geometrického tvaru není při daných poloměrech ohybu značná, nicméně změna tloušťky stěny a tvaru ovlivní polohu těžiště průřezu, tedy plochu (čáru) kdy je při ohybu $\varepsilon = 0$. Čím větší jsou úchytky tloušťky a čím větší jsou distorze pak při nárůstu tloušťky stěny vnitřního poloměru logicky plyne, že těžiště se posouvá k vnitřnímu poloměru. Na obr. 8.11a,c je zobrazen průřez bez distorze a deformovaný průřez v místě poloměru R57,2. Je zřejmé že průřezové charakteristiky (S_p , I) se budou lišit vzhledem ke změně těžiště deformovaného průřezu.



Obr. 8.11 Technologické zjednodušení deformace průřezu Obr. 8.12 Lokální změna tloušťky

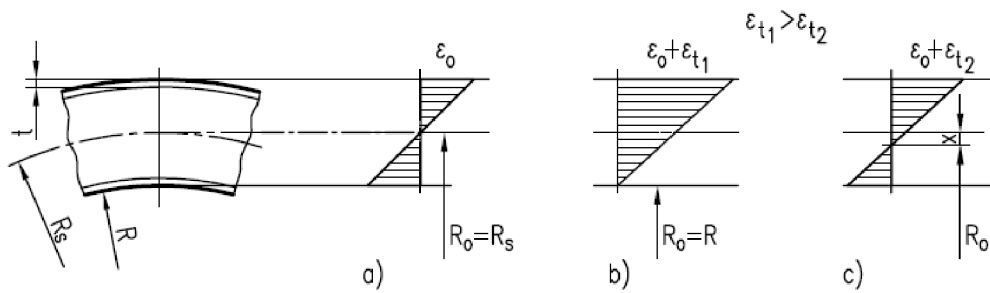
Vzhledem k tomu, že v oblasti rohů došlo k nahromadění materiálu oproti plynulé změně po obvodu je početní určení velmi pracné a v rámci časových možností nebylo možné tento přesný výpočet provést. Nicméně byl proveden zjednodušující propočet stěn následujícím způsobem.

- Nahrazení deformovaného průřezu obr. 8.11c pomocí výrazného technologického zjednodušení na lichoběžníkový tvar, dle obr. 8.11b.
- Určení statického momentu tohoto obrazce a následný přepočet na polohu těžiště s využitím výpočetní techniky, konkrétně programu AutoCAD na určení plochy a polohy těžiště elementárních obrazců.

Z uvedeného propočtu plyne, že posun je asi 1,4 mm. Vzhledem k velikosti tohoto posunu je nutné rozlišit následující případy:

- Pokud by se jednalo o čistý ohyb bez přídavných osových sil, lze tento posun v předešlých technologických propočtech zanedbat, obr. 8.13a.
- Při ohybu s tahovou nebo tlakovou silou dochází vzhledem k součtu deformací k posunu bodu $\varepsilon = 0$, tento posun závisí na ostrosti ohybu a velikosti vypínací tahové nebo tlakové síly. Například při extrémní navíjecí síle, kdy jde o špatnou geometrii trnu, špatné mazání, atd. se $\varepsilon = 0$ posouvá až k vnitřnímu poloměru

viz. obr. 8.13b. Vzhledem k profilu 20x20 mm jde o rozdíl mezi R_0 a R_s . V tomto případě činí posuv těžiště, v důsledku distorze, 1,4 mm oproti 10 mm 14% což lze zanedbat. V případě menší tahové či tlakové síly by už chyba se zanedbáním posunutí mohla být větší, obr. 8.13c.

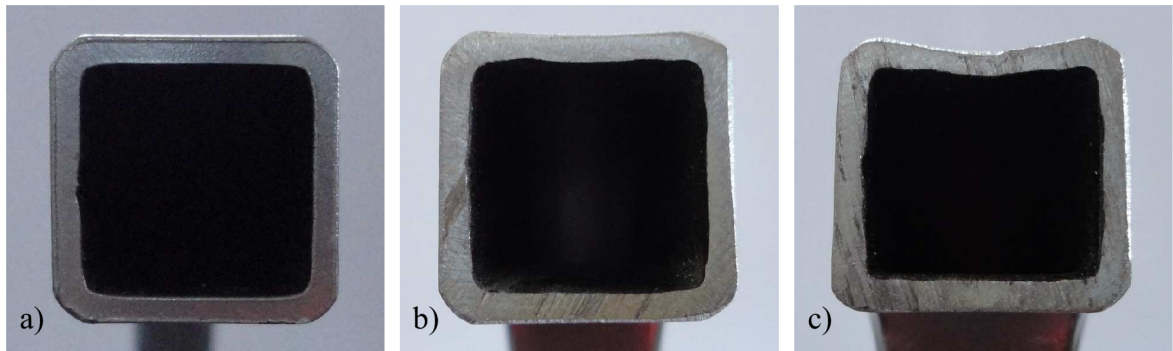


Obr. 8.13 Možné případy průběhu napětí při ohybu

9 TECHNOLOGICKÉ ZHODNOCENÍ VYRÁBĚNÉ SOUČÁSTI [5], [42]

Trubku, která je součástí sestavy závěsu pátých dveří automobilu Škoda Super 2. generace vyráběnou firmou Edscha Kamenice s.r.o. lze zhodnotit z několika různých pohledů, které budou popsány dále.

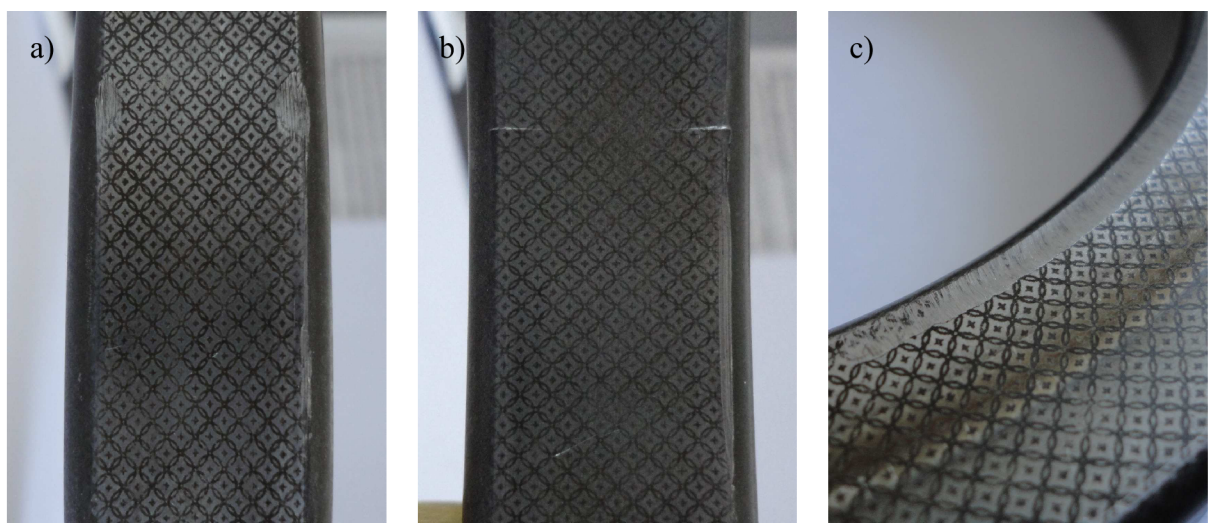
Z pohledu materiálu polotovaru trubky bylo pomocí deformační sítě zjištěno, že materiál má dostatečnou zásobu tvařitelnosti a to i v místě největšího ztenčení součásti, jak bylo podrobně popsáno v podkapitole 8.1.



Obr. 9.1 Jednotlivé průřezy trubky

Na obr. 9.1 jsou vyobrazeny jednotlivé průřezy trubky, na obr. 9.1a je původní průřez polotovaru trubky, na obr. 9.2b pak deformovaný průřez na poloměru ohybu $R131,5$ a obr. 9.2c ukazuje deformovaný průřez na poloměru ohybu $R57,2$. Z hlediska tolerancí součásti se jedná o přijatelný stav, viz geometrické tolerance plochy součásti v Příloze 3. Nicméně z technologického hlediska je zde několik pochybení, které jsou blíže popsány následovně.

Jak bylo popsáno v podkapitole 7.3 pro poloměru ohybu $R57,2$ je použit jednoduchý trn a poloměr $R131,5$ je vyráběn bez vnitřní výplně. Dle výrobců nástrojů pro ohýbání [5], [42] je pro tyto parametry ohybu doporučeno použít standardní kuličkový trn s jedním segmentem (obr. 5.10e) bez nutnosti vyhlazovače pro $R57,2$ a poloměr $R131,5$ je možné vyrábět bez vnitřní výplně. Použitý trn (obr. 7.8) je tedy nevyhovující nejen z tohoto pohledu ale i z pohledu špatného nastavení (obr. 5.11) a mazání, z čehož může pramenit tření (zadírání) atd., viz. kapitola 5, která se problematice nástrojů věnuje podrobně. Dle výrobců nástrojů [5], [42] a poznatkům [46] lze předpokládat, že při správném použití výše zmíněného kuličkového trnu by bylo možné zamezit deformaci průřezu obr. 9.1c.



Obr. 9.2 Defekty vyráběné součásti

Při podrobném zkoumání součásti lze definovat další méně závažné technologické chyby. Jedná se především o otlaky na vnější i vnitřní stěně trubky způsobené upínací čelistí, která svírá trubku při ohybu na poloměr R57,2, obr. 9.2a,b. Těmto otlakům však není možné příliš zamezit, neboť se jedná o tangenciálně navazující ohyby mezi kterými není potřebný rovný úsek pro správné upnutí. Např. dle [13] je doporučená minimální vzdálenost mezi ohyby rovna vnějšímu rozměru trubky. Ovšem vzhledem běžící výrobě součásti není možné měnit geometrii dílce. Určitého snížení otlaku by bylo možné dosáhnout snížením upínací síly popřípadě úpravou drážky nástrojů. Na obr. 9.2c je vidět, že při ohybu trubky na poloměr R57,2 dochází k částečnému prokluzu materiálu v matici, vlivem rozšiřování profilu na vnitřní straně ohybu. Tomuto defektu by bylo možné zamezit úpravou drážky matrice v podobě snížení drsnosti povrchu, změnou povrchové úpravy či změnou materiálu matrice.

10 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na problematiku ohybu profilových trubek, konkrétně pak na profil čtvercového průřezu, který je použit u reálné součásti. Základem pro řešení této problematiky bylo zpracování poznatků technologie ohybu kruhových trubek. Zde se jedná především o popis konvenčních, ale i nekonvenčních zařízení umožňující ohyb. Dále pak popis technologických parametrů v návaznosti na vznik defektů, aproximace ohybového napětí a výpočet ohybového momentu. Část práce se věnuje popisu jednotlivých nástrojů a především jejich vlivu na samotný proces ohybu z hlediska vzniku defektů.

Informace k ohybu trubek čtvercového průřezu, nebo obecně řečeno ohybu nekruhových průřezů, je v odborné literatuře velmi málo, rovněž tak informací ze strany výrobců nástrojů a firem zabývajících se ohybem trubek. Oslovené firmy tyto informace buď nemají a nebo je nechtějí poskytnout v rámci firemního tajemství. Z těchto důvodů bylo při definici parametrů ohybu čtvercových trubek využito několika literárních podkladů, které se této problematice alespoň částečně věnují. Dále pak poznatků z ohybu trubek kruhového průřezu, kterým byla věnována úvodní část práce, ale také samostatné poznatky (úvahy) s cílem porovnat ohyb čtvercové trubky s kruhovou.

Vlastní teoretický přínos práce spočívá ve stanovení příčin distorze čtvercového profilu, v porovnání průřezových charakteristik čtvercového a kruhového profilu a vlivu zaoblení rohů na průřezové charakteristiky. Bylo například zjištěno, že z hlediska ohybové tuhosti je kruhovou trubkou o rozměru 20x2 mm možné nahradit trubkou čtvercového průřezu o rozměru 20x1,25 mm. Tento přínos odpovídá současným trendům snižování hmotnosti vyráběných dílců a systémů tzv. lehčených konstrukcí, kde je velmi podstatné jakékoliv snížení hmotnosti.

Experimentálním přínosem práce je zpřesnění výsledků tahové zkoušky v podobě určeného exponentu deformačního zpevnění ($n = 0,14$), z kterého plyne malé zpevnění materiálu a také, vzhledem k poloměrům ohybu, volba ideálně tuhoplastického materiálového modelu pro výpočet ohybového momentu. Dále bylo pomocí metody deformační sítě zjištěno, že materiál má dostatečnou zásobu tvařitelnosti i v nejméně namáhaném místě ohybu, kterým je vnější tahová stěna, zde je vyčerpána přibližně polovina maximální tažnosti zkoumaného materiálu. Bylo provedeno měření tloušťky jednotlivých stěn nejméně deformovaného průřezu, a to pomocí mikrometru, tyto hodnoty byly v kritických bodech porovnány s propočtem změny tloušťky využitím deformační sítě. Výsledky nevykazují značné rozdíly což dokládá hodnověrnost měření mikrometrem. Poznatky o změně tloušťky umožnily provést technologické zjednodušení deformovaného průřezu, a to náhradou lichoběžníkovým tvarem. Byl zjištěn posuv těžiště od středního poloměru ohybu v hodnotě 1,4 mm. Tato hodnota, jinak zanedbatelná, může mít v případě ohybu s přídatnou tahovou či tlakovou osovou silou, výraznější vliv na proces ohybu a nelze ji tak plně zanedbat.

Poslední část práce je věnována vyráběné součásti z hlediska technologického zhodnocení její současné výroby, kdy nejvýraznější technologickou chybou je nevyhovující používaný trn.

Ze získaných poznatků při tvorbě práce lze konstatovat, že zvládnutí ohybu trubek čtvercového průřezu je náročnější než ohyb kruhových trubek. Nicméně vzhledem k uvedeným mnoha výhodám, především z pohledu hmotnosti a tuhosti, je vhodné se problematikou dále zabývat. Lze předpokládat, že podíl čtvercových trubek ve strojírenské výrobě se bude nadále zvyšovat, vzhledem k jejich výraznému potenciálu.

Diplomová práce je spojena s řešením specifického výzkumu ÚST Standart BD 13001024 „Řešení problematiky tvarování dílců z trubek“ a probíhala ve spolupráci s firmou Edscha Automotive Kamenice s.r.o.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FIŠAR, L. Moderní metody zakružování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D.
2. RIESNER, J., L. FIŠAR, K. MATOUŠEK a K. PODANÝ. Posouzení vhodnosti materiálu polotovarů pro ohyb trubek čtvercového průřezu. *Kovárenství*, 2010, roč. 2010, č. 38, s. 93 (s.)ISSN: 1213- 9289.
3. AL-QURESHI, H.A. Elastic-plastic analysis of tube bending. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. January 1999, Volume 39, Issue 1, s. 87-104. Dostupný také z WWW: <www.sciencedirect.com>.
4. *Automotive Space Frame Design* [online]. 2001-2010 [cit. 2011-05-24]. Capitolo 3 - Tecnologie. Dostupné z WWW: <<http://marcotraverso.it/>>.
5. *Bend Tooling incorporated* [online]. 2008 [cit. 2011-05-24]. Rotary-Draw Tube Bending Tools - Mandrel Bending Tools. Dostupné z WWW: <<http://www.bendtooling.com/>>.
6. BRALLA, James G. *Handbook of Manufacturing Processes: How Products, Components and Materials are Made*. 1st ed. New York: Industrial Press, 2006. 948 s. Dostupné z WWW: <<http://www.knovel.com>>. ISBN 978-0-8311-3179-1.
7. *CML USA, Inc.: Manufacturer of Tube, Pipe & Profile Bending Machinery* [online]. 2010 [cit. 2011-05-24]. Pipe bender & Tubing bender. Dostupné z WWW: <www.ercolina-usa.com>.
8. ČSN 22 6001. *Názvosloví technologie tváření kovů*. [s.l.]: [s.n.], 1968. 28 s.
9. ČSN EN 10305-5. *Ocelové trubky pro přesné použití - Technické dodací podmínky - Část 5: Svařované čtvercové a obdélníkové trubky kalibrované za studena*. [s.l.] : [s.n.], 1.7.2010. 20 s.
10. ČSN EN 13480-4. *Kovová průmyslová potrubí - Část 4: Výroba a montáž*. [s.l.] : [s.n.], 1.11.2003. 40 s.
11. ČSN EN 3658. *Letectví a kosmonautika - Ohyby trubek používaných v motorech - Konstrukční norma*. [s.l.] : [s.n.], 1.10.2008. 12 s.
12. DVORÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošené a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
13. ELFMARK, Jiří, et al. *Tváření kovů*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1992. 524 s. ISBN 80.03-00651-1.
14. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

15. Google [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Vyhledávání obrázků Google. Dostupné z WWW: <images.google.cz/>.
16. GOTO, Hiroyuki, et al. Applications with a new 6-DOF bending machine in tube forming processes. In *Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power: TOYAMA 2008*. [s.l.] : [s.n.], 2008. s. 183-188. Dostupné z WWW: <http://www.jfps.jp>. ISBN 4-931070-07-X.
17. HESTON, Tim. Tube bending with no straights? No problem. *The Fabricator* [online]. 2010, November 2010, [cit. 2011-03-30]. Dostupný z WWW: <http://www.thefabricator.com>.
18. *Horn Machine Tools, Inc.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Tube Bender Tooling. Dostupné z WWW: <http://www.hornmachinetools.com>.
19. HOSFORD, William F. and Robert M. CADDEL. *Metal forming: Mechanics and Metallurgy*. 3th ed. New York: Cambridge university press, 2007. 365 s. ISBN-13 978-0-521-88121-0, ISBN-10 0-521-88121-8.
20. KŘÍŽ, Rudolf, Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka 8.svazek*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1998. 255 s. ISBN 80-7183-054-2.
21. LI, H., et al. Deformation behaviors of thin-walled tube in rotary draw bending under push assistant loading conditions. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, Volume 210, Issue 1, s. 143-158. Dostupný také z WWW: <www.sciencedirect.com>.
22. LI, Wenchuan and Y. Lawrence YAO. Laser Bending of Tubes: Mechanism, Analysis, and Prediction. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2001, Volume 123, Issue 4, s. 674-681. Dostupný také z WWW: <http://www.asmedl.org/>.
23. MARCINIAK, Zdzislaw, John L. DUNCAN and Jack S. HU. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 0750653000.
24. MATOUŠEK, Karel. *Řešení problematiky ohýbání dílců z tenkostěnných profilů*. [s.l.], 2010. 51 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
25. MEGHARBEL, A. El, G.A.El NASSER and Aly El DOMIATY. Bending of tube and section made of strain-hardening materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 18. July 2008, Volume 203, s. 372-380. Dostupný také z WWW: <www.sciencedirect.com>.
26. MILLER, Gregory. *Tube forming processes: a comprehensive guide*. [s.l.] : [s.n.], 2003. 385 s. Dostupné z WWW: <books.google.cz>. ISBN 978-0872636330.
27. *Mitutoyo s.r.o.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Micrometers. Dostupné z WWW: <www.mitutoyo.com>.

28. NAYYAR, Mohinder L. *Piping handbook*. 7th. ed. [s.l.] : McGraw-Hill, 2000. 2256 s. Dostupné z WWW: <<http://www.knovel.com/>>. ISBN 978-0-07-047106-1.
29. OMNI-X CZ s.r.o.: *Evropský výrobce nástrojů pro ohýbačky trubek* [online]. 2006 [cit. 2011-03-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.omni-x.cz>>.
30. ORBAN, H., et al. Wrinkling detection in tube bending simulations. *Transactions of NAMRI/SME*. 2007, Volume 35, s. 105-112. Dostupný také z WWW: <<http://me.engin.umich.edu/>>.
31. PODANÝ, K., R. SAMEK, R. and K. MATOUŠEK. Mechanics of square tubes bending and cross section distortion. *MM Science Journal*, 2010, roč. 2010, č. 4, s. 209 (s.)ISSN: 1803- 1269.
32. *RKM servis* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Ohýbačky trubek. Dostupné z WWW: <www.rkmservis.cz>.
33. SAMEK, R. and A. ČALKOVSKÝ. Contribution to the Wood's forming charts. *In ICIT'99: Proceedings of the 2nd International Conference in Industrial Tools*. 1999, 1, s. 478-483.
34. SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření: část 1.* 1.vyd. Brno: CERM, 2010. 134 s. ISBN 978-80-214-4220-7.
35. SAMEK, Radko a Renata NETUŠILOVÁ. *Návrh a ověření rovinného a prostorového ohybu tenkostěnných trubek pro dílce leteckých motorů*. 1. vyd. Brno : Vojenská akademie Antonína Zápotockého v Brně, 1983. 56 s.
36. SEMIATIN, S.L., et al. *ASM Handbook : Volume 14B Metalworking: Sheet forming*. 1st ed. Ohio : ASM International, 2006. 924 s. ISBN -13: 978-0-87170-710-9, ISBN-10: 0-87170-710-1.
37. SMITH, Bill and Mark KING. Bending square and rectangular tubing: Modern science or ancient art?. *TheFabricator* [online]. May 16, 2002, 1, [cit. 2011-05-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.thefabricator.com>>.
38. STRÁNSKÝ, Lubomír, Martin PETRENEC a Eva MOLLÍKOVÁ. Stanovení exponentu deformačního zpevnění. *Podklady do cvičení 5FM : Fyzika materiálů*. 2009.
39. *Škoda Auto a.s.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Superb. Dostupné z WWW: <www.skoda-auto.cz>.
40. ŠMEHLÍKOVÁ, Eva a Kamil Podaný. Význam a uplatnění elektrolyticky nanesené sítě na povrchu vzorků. *In FSI junior konference 2002 Brno. ICIT'99: Proceedings of the FSI junior konference Brno 2002*, 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fond rozvoje vědy FSI, čís.FP 320044, 9.-13.12.2002. s. 268-272. ISBN 80-214-2290-4. uplatnění
41. *Technická univerzita Liberec* [online]. 2005 [cit. 2011-05-24]. Katedra strojírenské technologie. Dostupné z WWW: <<http://www.ksp.tul.cz/>>.

42. *Tools For Bending, Inc.* [online]. 2001 [cit. 2011-05-24]. Tooling. Dostupné z WWW: <<http://www.toolsforbending.com>>.
43. *Tube Bending Concepts, Inc.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Products. Dostupné z WWW: <<http://www.tubebendingconcepts.com>>.
44. *Unison CNC Tube Bending Machines* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Products. Dostupné z WWW: <www.unisonltd.com>.
45. VOLLERTSEN, Frank, et al. Extrusion, channel, and profile bending: a review. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999, Volume 87, Issues 1-3, s. 1-27. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
46. WANT, Bob. Bending nonround tubing: Considerations for square, rectangular, and oval tubing. *The Fabricator* [online]. 1.8.2009, 1, [cit. 2011-05-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/bending-nonround-tubing>>.
47. ZENG, Yuansong a Zhiqiang LI. Experimental research on the tube push-bending process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, Volume 122, Issues 2-3, s. 237-240. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
48. ZHANG, Y. and D. REDEKOP. Shell element simulation of the push method of tube bending. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2006, Volume 17, Issue 1-2, s. 301-304. Dostupný také z WWW: <<http://www.journalamme.org/>>.
49. ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *Speciální letecké technologie I.* 1. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. 219 s. ISBN 80-214-0128-1.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
1-6	jednotlivé místa měření stěny	[-]
a	vzdálenost vln	[mm]
A ₅	tažnost	[%]
A-H	jednotlivé stěny trubky	[-]
b	šířka	[mm]
c _{1,2}	tolerované vzdálenosti zaoblení od stěny trubky	[mm]
d	vnitřní průměr trubky	[mm]
D	vnější průměr trubky	[mm]
\bar{D}	modul zpevnění	[MPa]
D _{max}	maximální průměr trubky	[mm]
D _{min}	minimální průměr trubky	[mm]
d _{o1-4}	jednotlivé průměry trubky	[mm]
e	vypočítáno pomocí deformační sítě	[-]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	síla	[N]
F _{r1,2}	síla v radiálním směru	[N]
h	výška profilu čtvercové trubky	[mm]
h _m	střední výška sousedních vln	[mm]
h _{trn s}	rozměr kuličkového segmentu trnu	[mm]
h _{trn t}	rozměr těla trnu	[mm]
h _v	vnitřní rozměr trubky	[mm]
I	kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
I'	kvadratický moment části průřezu	[mm ⁴]
K	materiálová konstanta	[MPa]
K _o	koeficient ovality	[%]
K _z	koeficient ztenčení stěny	[%]
l _{1,2}	délka deformované kružnice	[mm]
m	měření pomocí mikrometru	[-]
M	ohybový moment	[Nm]
M _{Oa}	elastický ohybový moment	[Nm]
M _{Ob}	ideálně pružně plastický ohybový moment	[Nm]
M _{Oc}	ideálně tuhoplastický ohybový moment	[Nm]
M _{Od}	tuhoplastický ohybový moment se zpevněním	[Nm]
M _{Oao}	elastický ohybový moment čtvercové trubky	[Nm]
M _{Obo}	ideálně tuhoplastický ohybový moment čtvercové trubky	[Nm]
M _{Oco}	tuhoplastický ohybový moment čtvercové trubky se zpevněním	[Nm]
M _{Odo}	ideálně pružně plastický ohybový moment čtvercové trubky	[Nm]
M _{Oel}	obecný elastický ohybový moment	[Nm]
M _{Oeo}	nelinerární pružně plastický ohybový moment (integrovaný)	[Nm]
M _{Opl}	obecný plastický ohybový moment	[Nm]
M' _{Oeo}	nelineární pružně plastický ohybový moment	[Nm]
n	exponent deformačního zpevnění	[-]
r	poloměr zaoblení rohu čtvercové trubky	[mm]
r _k	poloměr střední kružnice trubky	[mm]
r _n	zaoblení hrany nástroje	[mm]
r _{trn}	zaoblení hrany trnu	[mm]
R	vnitřní poloměr ohybu	[mm]

R_0	poloměr ohybu dílce při zatížení ohybovým momentem	[mm]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_o	poloměr ohybu nulového přetvoření	[mm]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
R_s	střední poloměr ohybu	[mm]
R_{zb}	poloměr ohybu dílce po odlehčení	[mm]
s	výška tyče	[mm]
S	plocha	[mm ²]
S_p	statický moment průřezu	[mm ³]
S_p'	statický moment části průřezu	[mm ³]
t	tloušťka stěny	[mm]
t_{max}	maximální tloušťka stěny	[mm]
t_{min}	minimální tloušťka stěny	[mm]
t_o	původní tloušťka stěny	[mm]
u	nekruhovitost	[%]
x	délka nezakružené části	[mm]
$-x$	posunutí osy nulového přetvoření vlivem tlaku	[mm]
$+x$	posunutí osy nulového přetvoření vlivem tahu	[mm]
y	vzdálenost bodu na střední kružnici	[mm]
y_e	polovina tloušťky elastické vrstvy	[mm]
α	úhel ohybu	[°]
α'	materiálová konstanta (poměr napětí)	[-]
ϵ	poměrné přetvoření	[-]
$\epsilon_{1,2,3}$	poměrná přetvoření v jednotlivých směrech	[-]
ϵ_c	celkové poměrné přetvoření	[-]
ϵ_{ef}	poměrné efektivní přetvoření	[-]
ϵ_o	osové přetvoření	[-]
ϵ_r	radiální přetvoření	[-]
ϵ_t	tangenciální přetvoření	[-]
$\epsilon_{t1,2}$	poměrné přetvoření vlivem přídatného napětí	[-]
ϵ_T	mez tvařitelnosti	[-]
ϵ_y	poměrné prodloužení na mezi kluzu	[-]
σ	napětí	[MPa]
$\bar{\sigma}$	skutečné napětí	[MPa]
$\sigma_{1,2,3}$	napětí v jednotlivých směrech	[MPa]
σ_k	mez kluzu	[MPa]
σ_x	obecné napětí při ohybu	[MPa]
φ	logaritmické přetvoření	[-]
$\varphi_{1,2,3}$	logaritmická (skutečná) přetvoření v jednotlivých osách	[-]
φ_{ef}	efektivní logaritmické přetvoření	[-]
φ_k	úhel sledovaného bodu	[°]
θ	úhel odklonu stěny trubky	[°]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Tabulky výrobců pro volbu nástrojů

Příloha 2 – Výroba trubky čtvercového průřezu

Příloha 3 – Výřez z výrobního výkresu

Příloha 4 – Naměřené hodnoty pomocí metody deformační sítě