



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH VÝROBY OCHRANNÉ VLOŽKY DO CHLADIČE PÁRY

MANUFACTURING OF THE STEAM ATTEMPERATOR PROTECTIVE LINER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Kukla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Eva Peterková, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Petr Kukla
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Eva Peterková, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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

Návrh výroby ochranné vložky do chladiče páry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh inovace současného postupu výroby ochranné vložky do chladiče páry. V rámci řešení dané problematiky bude hledána vhodná technologie výroby, která by urychlila a zjednodušila stávající způsob výroby dané součásti. Dílec je z větší části tvořen z trubky s rozšířeným koncem.

Cíle bakalářské práce:

Popis současného stavu výroby.

Přehled možných způsobů výroby zadaného dílce.

Volba nové vhodné technologie výroby a literární studie dané problematiky.

Návrh nového postupu výroby a provedení potřebných technologických a konstrukčních výpočtů.

Návrh vhodného nástroje, případně stroje pro danou výrobu.

Technicko-ekonomické hodnocení navrženého postupu výroby a závěry.

Seznam doporučené literatury:

SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. Speciální technologie tváření: Část I. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-214-4220-7.

SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. Speciální technologie tváření: Část II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4220-7.

TSCHATTSCH, Heinz. Metal forming practise: processes - machines - tools. New York: Springer-Verlag, c2006. ISBN 35-403-3216-2.

Handbuch der Umformtechnik: processes - machines - tools. New York: Springer, c1996. ISBN 35-406-1099-5.

SUCHY, Ivana. Handbook of die design: processes - machines - tools. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2006. ISBN 00-714-6271-6.

LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření: processes - machines - tools. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 4., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3425-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

KUKLA Petr: Návrh výroby ochranné vložky do chladiče páry.

Bakalářská práce se zabývá návrhem inovace výroby vložky do chladiče páry. Součást bude vyrobena z nízkolegované oceli EN 10216-2 10CrMo9-10. Předložená práce obsahuje přehled možných způsobů výroby, kde jako nejvhodnější byla vybrána technologie rozšiřování konců trubek nepohyblivým trnem. Provedením tahové zkoušky byly získány požadované parametry materiálu. Funkčnost vybrané technologie byla ověřena analytickými výpočty a simulací MKP. Dle stanovené tvářecí síly (810 kN) byl pro výrobu zvolen elektro-hydraulický lis OMCN 164 o jmenovité síle 1000 kN, který je pro výrobu dané součásti plně dostačující. Riziko vzniku defektů během tvářecího procesu bylo výpočty a simulací vyloučeno. V technicko – ekonomickém hodnocení byla vyhodnocena značná finanční úspora přesahující 53 %. Závěrem bylo zhodnoceno, že tato optimalizace výroby je technicky přijatelná.

Klíčová slova: rozšiřování, trubka, metoda konečných prvků, tahová zkouška, plošné tváření

ABSTRACT

KUKLA Petr: Manufacturing of the steam attemperator protective liner.

The Bachelor's thesis deals with the innovation of the manufacturing of the steam attemperator protective liner. The part will be made of low – alloy steel EN 10216-2 10CrMo9-10. The presented work contains an overview of possible production methods, where the technology of pipe end flaring with a fixed mandrel was chosen as the most suitable. The required material parameters were obtained by the tensile test. The application of the selected technology method was verified by analytical calculations and FEM simulation. According to the determined forming force (810 kN), an electro – hydraulic press OMCN 164 with nominal force 1000 kN was chosen. This machine is fully sufficient for the production of this component. The risk of occurring of a defects was excluded based on calculations and simulation. There was assessed considerable financial saving over 53 % in the technical and economic evaluation. In conclusion, this optimization of production is technically acceptable.

Keywords: flaring, pipe, finite element method, tensile test, sheet metal forming

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUKLA, Petr. *Návrh výroby ochranné vložky do chladiče páry*. Brno, 2018. 44s, 6 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25. 5. 2018

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval především své vedoucí práce Ing. Evě Peterkové, Ph.D., za její velkou ochotu, pomoc, vstřícnost a cenné rady, které mi poskytla během řešení této práce a to jak po stránce odborné, tak i stylistické. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Barboře Kudláčové a Ing. Lucii Zemanové za obětavost, ochotu a odborné rady poskytnuté zejména během vyhodnocování tahové zkoušky a rozboru početních výpočtů, panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za pomoc při provedení simulace MKP, firmě CCI Czech Republic s.r.o. za zhotovení vzorků pro tahovou zkoušku a rovněž panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za realizaci tahové zkoušky a za poskytnutí všech formálních informací důležitých k řádnému vyhotovení závěrečné práce na FSI VUT v Brně Odboru technologie tváření kovů a plastů.

V neposlední řadě patří velké poděkování mým rodičům, přítelkyni a svým blízkým za jejich podporu během studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Aktuální stav technologie výroby	11
1.2 Použité materiály	13
1.3 Návrh vhodných způsobů výroby	13
1.3.1 Zhodnocení navržených metod	18
2 TECHNOLOGIE ROZŠIŘOVÁNÍ KONCŮ TRUBEK	19
2.1 Stanovení potřebné síly	20
2.2 Stanovení konečné tloušťky	24
2.3 Technologické limity	25
3 NÁVRH POSTUPU VÝROBY	27
3.1 Experimentální ověření mechanických vlastností - tahová zkouška	27
3.1.1 Výroba a geometrie zkušebních vzorků	28
3.1.2 Parametry zkušebního stroje	29
3.1.3 Průběh tahové zkoušky	29
3.1.4 Vyhodnocení jednotlivých metod	31
3.1.5 Zhodnocení výsledků	33
3.2 Stanovení délky polotovaru	33
3.3 Početní ověření funkčnosti metody	35
3.3.1 Analytické výpočty	35
3.3.2 MKP simulace	37
3.3.3 Porovnání početních metod	39
3.4 Návrh nástroje a výrobního postupu	40
4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	43
5 ZÁVĚRY	44

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD [6], [7]

Současný celosvětový stav v produkci strojních a spojovacích součástí z kovu a jejich slitin je vzhledem k širokým možnostem trhu neustálým bojem o zákazníka. Mezi hlavními požadavky těchto společností se mimo optimální kvality řadí zejména rychlost a cena dodávek.

Tyto aspekty lze řešit několika způsoby, jako jsou: zavedení více sériových kroků v kusové výrobě, snížení počtu operací, použití lehčích a pevnějších slitin, lidskou práci více automatizovat, snížit množství odpadu atd. Cílem, jak tohoto dosáhnout, je mít ideálně optimalizovaný výrobní proces a hlavně ekonomicky efektivní výrobní technologie. Těch je v oblasti strojírenství celá řada a pro jednotlivé součásti je třeba pečlivě vybrat každou technologii zvlášť.

Například běžné třískové obrábění a svařování může být ve spoustě případů nahrazeno plošným a objemovým tvářením, které je několikanásobně předčí v produktivitě, nákladech a výrobních časech při zachování požadované kvality. Jako názorný příklad poslouží trubky, u kterých se při jejich tvarování využívá různých metod tvářením, jako je ohýbání, rozšiřování, zužování atd. Příklady součástí vyráběné těmito metodami jsou uvedené na obr. 1.

Právě takovou změnou technologie se zabývá tato bakalářská práce, jejímž záměrem je navrhnout technologii výroby plošného tvářením, která by nahradila současnou výrobu třískovým obráběním a svařováním s následným tepelným zpracováním. Samozřejmostí je přihlídnutí k ekonomickým aspektům.

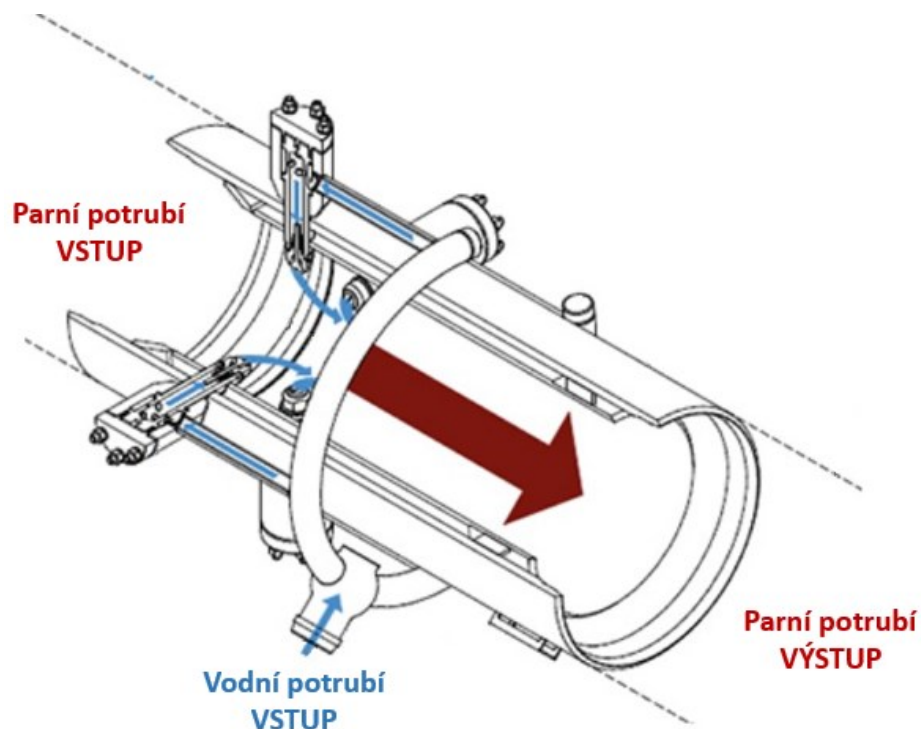


Obr. 1 Příklady tvářením trubek [25], [26], [27]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [1]

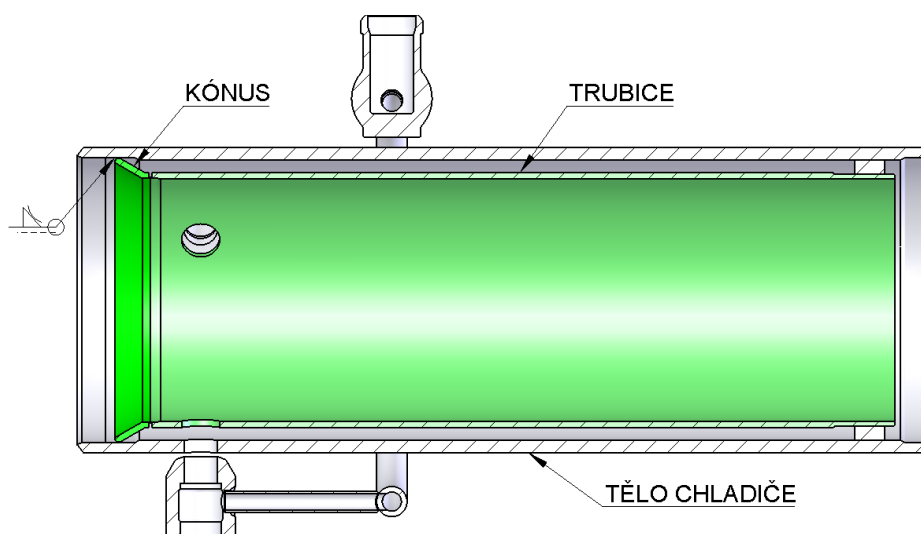
Návrh vhodné alternativy technologie výroby se týká vložky chladiče páry společnosti IMI CCI, typ DAM-4010/4, viz obr. 2

Tento chladič páry slouží ke kontrolované úpravě, respektive zchlazení, teploty páry v elektrárnách, a to v typech aplikací pracujících v podmínkách v rozmezí 40 – 200 bar(g) a 450 – 610 °C. Aby funkce chladiče byla co možná nejefektivnější, je třeba mimo jiné zajistit primární, sekundární a terciální atomizaci vody, kde k první jmenované dojde přímo uvnitř zástřikové trysky, jelikož jejíž konstrukce je tomuto předurčena, a ke zbývajícím dvěma dojde právě v dané vložce.



Obr. 2 Chladič páry, typ IMI CCI: DAM – 4010/4 [1]

Vložka se skládá ze dvou dílců, a to kónusu a trubice (obr. 3). Je navařena v místě zástřikového systému uvnitř hlavního těla chladiče (čímž většinou bývá bezešvá trubka nebo svařený skružený plech). Slouží jako ochrana tohoto těla před teplotními šoky, neočekávaným přestříkáváním, jehož důsledek jsou erozně působící nevypařené kapičky vody, ale hlavně působí jako funkční element zajišťující dostatečné zrychlení proudu páry v místě zástřiku a tím podporující sekundární atomizaci vody. K terciální atomizaci následně dochází na konci vložky, kde se proud rozbíjí o hranu stěny při expandování z menšího průměru na větší.



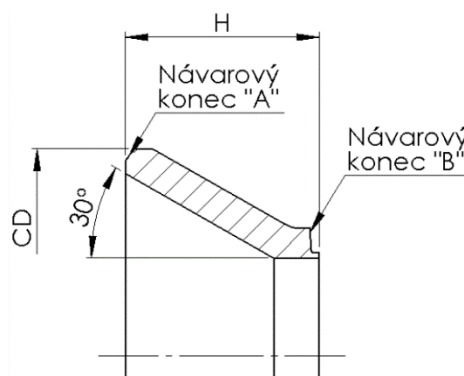
Obr. 3 Svarek chladiče, typ IMI CCI: DAM – 4010/4

1.1 Aktuální stav technologie výroby

Jelikož celý chladič je silně zákaznický orientován, tzn. jeho tvar, rozměry, funkčnost se vždy navrhuje dle požadavků zákazníka, tak i jednotlivé díly vložky musí být navrženy vzhledem k těmto náležitostem.

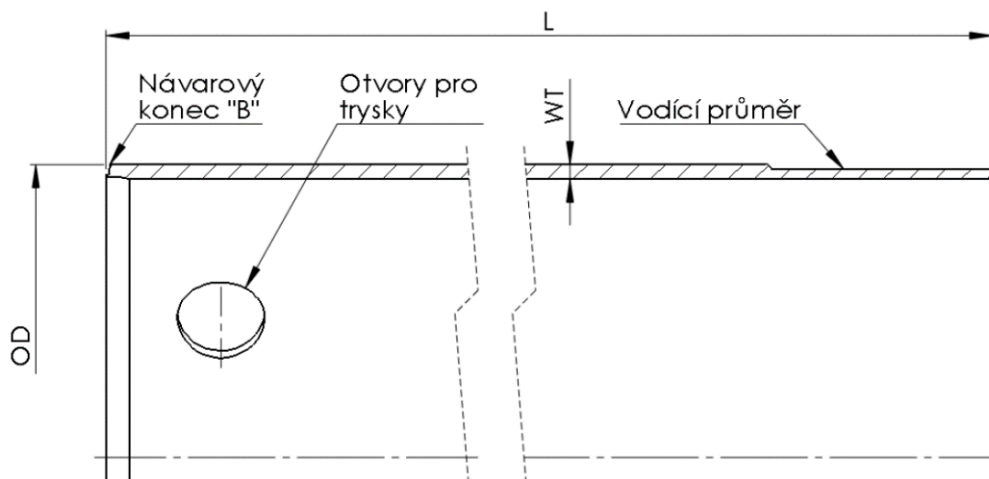
Kompletní výroba, která činí přibližně 150 – 200 ks/rok probíhá výhradně ve výrobních prostorách firmy CCI Czech Republic, s.r.o., která disponuje různými druhy NC a CNC obráběcích strojů, lisů, vlastní svařovnou, montážní linkou, lakovnou atd. Pro vytvoření ucelené představy je níže uveden základní popis a způsob stávající výroby kónusu a trubice těla chladiče.

- Kónus – jak vyplývá již z jeho názvu, jedná se o dílec kuželovitého tvaru s vrcholovým úhlem 60° . Tento úhel je důležitý pro vytvoření správného profilování proudu páry. Oba konce tohoto dílce jsou upraveny pro přivaření jak k hlavnímu tělu chladiče "A", tak k samotné trubici "B", viz obr. 4. Druh polotovaru závisí na velikosti samotného dílce, přičemž je především rozhodující cena a dostupnost na trhu. Pro průměry "CD" < 450 mm a výšky kónusu "H" < 80 mm je vhodný výpalek z plechové tabule. Pro výšku "H" > 80 mm, vzhledem k nedostupnosti takové tabule plechu na trhu, se jako polotovar musí použít výkovek. Jeho efektivní využití je do "H" < 150 mm, jelikož potom by odpad způsobený obráběním působil moc velké ztráty a tak se jako vhodnější varianta nabízí skružený svařený plech. Samotná výroba dílce se provádí na soustruhu za pomoci upínacích přípravků.



Obr. 4 Kónus

- Trubice – jedná se o jednoduchý dílec, který je možné vidět na obr. 5. Základní rozměry vychází z dané konfigurace dle operačních podmínek. Polotovarem je normalizovaná bezešvá trubka o průměru "OD" 200 – 500 mm, tloušťce stěny "WT" 8 – 13 mm a délce "L" 650 – 1550 mm. Jeden konec ("B") je připraven na svaření s kónusem, druhý je bez obrobění. V radiálním směru na osu trubice je stěna "WT" provrtána otvory pro vložení zástřikových trysek, jejichž počet závisí na pracovních podmínkách chladiče. Na výrobu je tedy třeba použít jak soustruh, tak i víceosou frézku.



Obr. 5 Trubice

Takto vyrobené dílce jsou posílány na svařovnu, kde se v místě návarového konce "B" provede jejich vzájemné svaření, tepelná úprava a nedestruktivní zkoušky. Jelikož právě tepelná úprava mnohdy může způsobit mírné pokroucení svaru, je proto znovu nutné provést převoz na obrobnu, kde se na soustruhu začistí a upraví oba konce a vodící průměry. Kompletně hotový svarek, resp. vložka chladiče, je na obr. 6.

Výše zmíněné kroky výroby byly popsány stručně, ale v praxi je tato výroba velmi zdlouhavá, upínání dílů složité a časově náročné. Nesmí se také zapomenout na to, že před samotnou výrobou je zahrnuta složitá předvýrobní fáze pro každý z těchto dvou dílů. Jedná se především o konstrukční návrh, technologický postup, plán výroby, nákup, vstupní kontrola, uskladnění apod. Všechny tyto kroky společně se samotnou výrobou dělají z tohoto svaru velmi drahou a časově náročnou záležitost, takže optimalizace předvýrobního a výrobního procesu by mohla výrazně tyto náklady a časovou náročnost snížit. Ideální variantou se pro tuto optimalizaci nabízí nahrazení svaru jednou tvářenou součástí, jejímž polotovarem bude bezešvá trubka.



Obr. 6 Svarek vložky: kónus + trubice

1.2 Použité materiály [3], [4], [5]

Oba dva dílce se vždy vyrábí ze stejné materiálové třídy, ale jak bylo poznamenáno v předchozí kapitole, liší se typem polotovaru. Důvodem je efektivní a levnější výroba. Jelikož řešená optimalizace technologie výroby pracuje s předpokladem využití plošného tváření u dílce s označením trubice, je možné se tedy zaměřit pouze na tento materiál. Tím je bezešvá trubka z oceli EN 10216-2 10CrMo9-10 s ekvivalentem dle ČSN 15 313 (1.7380) a ASME SA-335 P22.

Jedná se o nízkolegovanou žáropevnou ocel, za tepla dobře tvárnou a obrobitelnou. Vyznačuje se dobrou odolností proti korozi v prostředí vodní páry a dokáže odolat pracovním podmínkám za teplot až 590 °C. Proto je její největší užití zejména v energetice a chemickém průmyslu jako části kotlů, tlakové nádoby, armatury či ventily atd. Mechanické vlastnosti a chemické složení je uvedeno v tab. 1, resp. tab. 2.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti oceli 10CrMo9-10 [4], [5].

Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	Tažnost A [%]	
		podélná	příčná
480 - 630	280	22	20

Tab. 2 Chemické složení oceli 10CrMo9-10 [4], [5].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
0,05-0,15	≤ 0,5	0,3-0,6	≤ 0,025	0,417	1,9-2,6	0,87-1,13

1.3 Návrh vhodných způsobů výroby [7], [8], [9], [10], [12], [13], [15], [20]

Jak bylo zmíněno v přechodí kapitole, ideální technologie na optimalizaci výrobního procesu bude zahrnovat tvářecí proces, který vychází z technologie plošného tváření. V této problematice existuje celá řada metod, nicméně jen pár z nich se jeví pro toto řešení jako vhodné.

- a) Hydroforming – jedná se o nejpoužívanější metodu tváření trubek kapalinou. Jednou operací dokáže zhotovit i výrobky, které se běžně vyrábějí z více dílců za pomoci svařování. Princip spočívá ve tváření materiálu pomocí kapaliny, která je pod tlakem axiálně vtlačována dovnitř polotovaru, čímž se polotovar deformuje dle vnitřní kontury formy, ve které proces probíhá, viz obr. 7.

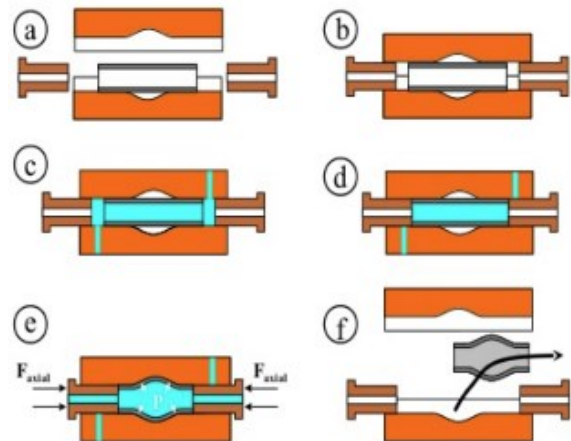
Výhody:

- díky nestlačitelnosti se kapalina dokonale přizpůsobuje tvaru formy,
- bezproblémové vyjmutí,
- velká jakost povrchu.

Nevýhody:

- nutnost zajištění dokonalé těsnosti,
- v oblastech ostřejších rohů může dojít k nežádoucímu ztenčení stěny.

- a – vložení materiálu do formy
- b – uzavření formy
- c – napuštění kapalinou
- d – uzavření
- e – axiální stlačení materiálu a regulace tlaku
- f – vyjmutí hotového dílce



Obr. 7 Postup vysokotlakého hydroformingu [11]

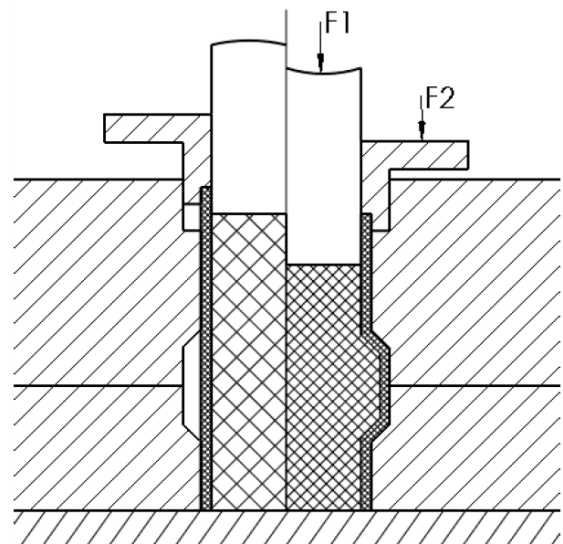
- b) Radiální vypínání nepevným nástrojem – tato metoda je velmi podobná hydroformingu, kde vedle kapaliny nebo oleje se jako médium ke zhotovení výrobku může použít třeba pryž (Polyuretan). Princip metody je znázorněný na obr. 8.

Výhody:

- bezproblémové vyjmutí,
- velká jakost povrchu.

Nevýhody:

- může docházet k zadírání pryže,
- potřeba vyšších tvářecích sil.



Obr. 8 Princip tvarování trubky tlakem elastomeru [12]

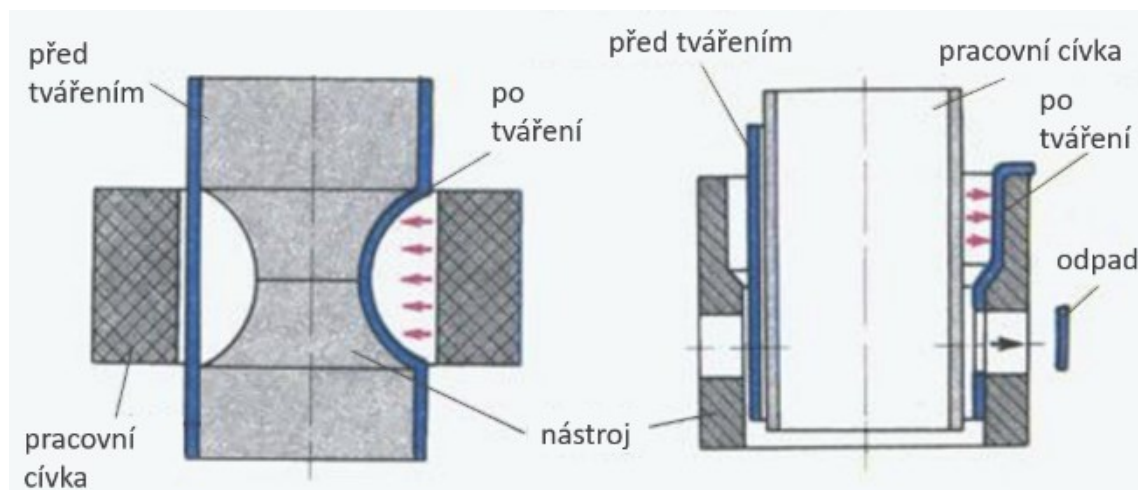
- c) Magneticko-impulzní tváření (MIT) – tvářecí proces využívá záporných magnetických polí. V kondenzátoru se indukuje extrémně vysoký proud, který prochází indukční cívkou ve velmi krátkém čase a indukuje tak vysoké magnetické pole mezi touto cívkou a tvářeným materiálem. Velikost pole může být regulována kapacitou kondenzátoru nebo velikostí elektrického napětí. Magnetické pole potom dokáže tvářet za tlaku až 1000 MPa a rychlostí $270 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Příklad redukce a rozšiřování společně s děrováním je na obr. 9.

Výhody:

- výrazné zkrácení výrobních časů,
- jednoduchá regulace tvářecích sil,
- malá hmotnost a hlučnost.

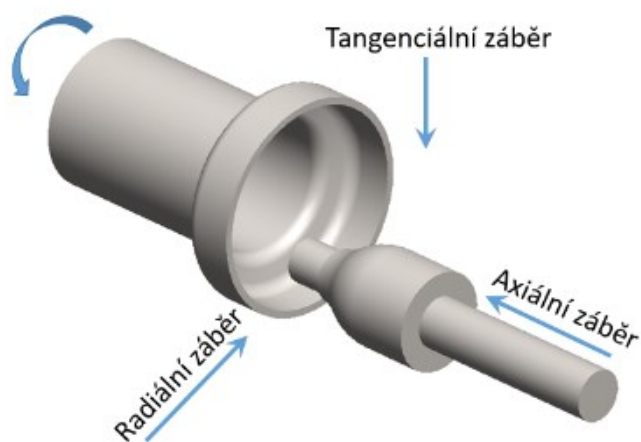
Nevýhody:

- konstrukce cívek musí být vždy navržena dle požadovaného tvaru výrobku.



Obr. 9 Princip magneticko-impulzního tváření [14]

- d) Experimentální metoda rotujícího nástroje – jedná se metodu, jejíž technika je prozatím v pouze experimentální fázi. Využívá standardního konvenčního soustruhu a jeho částí, na obr. 11 je znázorněné zjednodušené schéma. Základní materiál je sevřený v čelistech, takže je zamezeno posuvu v axiálním směru. Samotný nástroj je uložen excentricky vůči čelistem a je upnutý přes uložení pero/ drážka v ložiskovém tělese. Za pomoci stojanu a jeho částí se posouvá směrem k polotovaru a v momentě jejich kontaktu se roztočí. Součást je možné zhotovit již za pomoci jednoho zdvihu, jelikož na tvářením se podílí 3 druhy záběrů, axiální, radiální a tangenciální. Jejich schéma společně se smyslem působení je uvedeno na obr. 10. Samozřejmostí je použití dobrých chladicích kapalin k minimalizování tření a přenosu tepla.



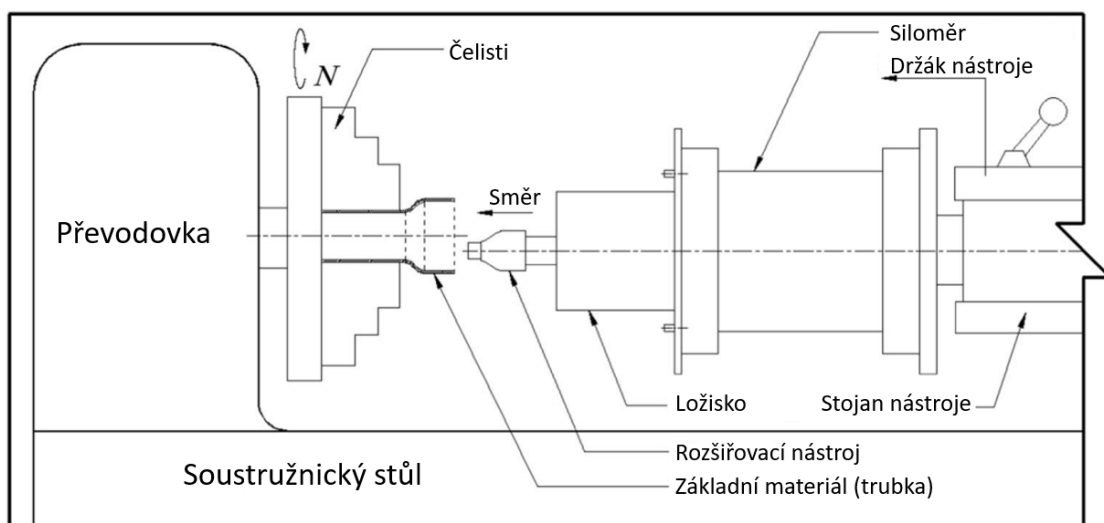
Obr. 10 Rozložení jednotlivých záběrů [16]

Výhody:

- bezproblémové vyjmutí,
- využití běžného konvenčního soustruhu,
- rychlost tvářením a jednoduchost.

Nevýhody:

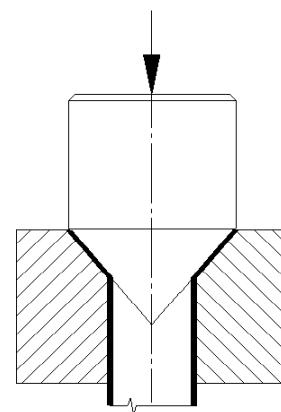
- možnost tvářením pouze malých průměrů,
- riziko poškození mechanismu stroje,
- horší přesnosti tvářecího procesu.



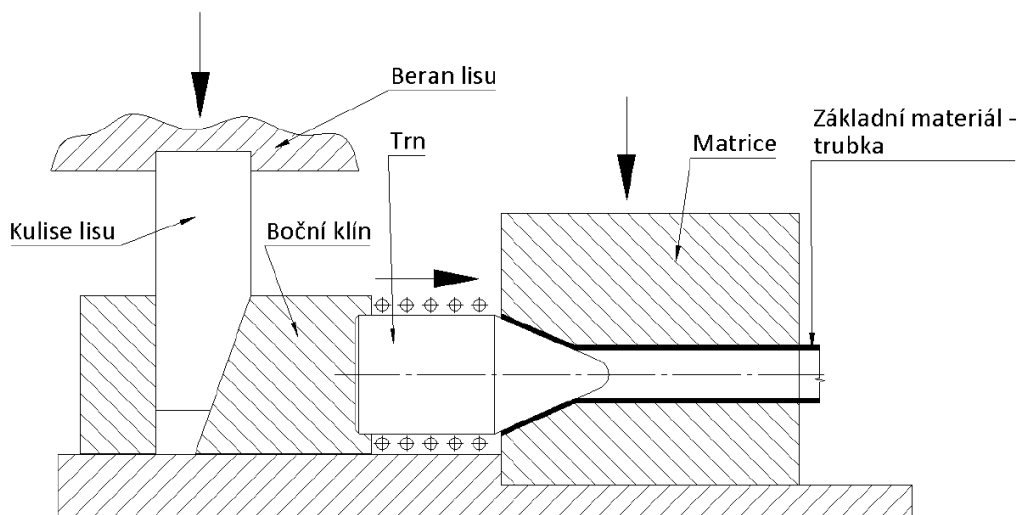
Obr. 11 Schéma metody rotujícího nástroje [16]

e) Rozšiřování konců trubek – jedná se o jednodušší metodu plošného tváření, kdy je jeden konec pevně uchycen např. v matricích nebo čelistech a druhý konec je tvářen nástrojem. Tato metoda má více výrobních možností, které jsou uvedeny níže.

- S pohyblivým trnem – trubka je upnuta pevně v matrici a působením tlaku kuželového trnu dochází k rozšíření. Nejjednodušší způsob je znázorněn na obr. 12, kdy je nástroj v podobě kuželového trnu upnut v beranu lisu a vertikálním pohybem dochází k zasouvání trnu do trubky, jejíž konec se tvaruje dle vrcholového úhlu kužele a otvoru matrice. Pro trubky větších délek je možné užít jiné konstrukční řešení, které využívá bočního klínu. Ten je ovládaný beranem lisu za pomoci kulisy, čímž je zajištěn pohyb, viz obr. 13.

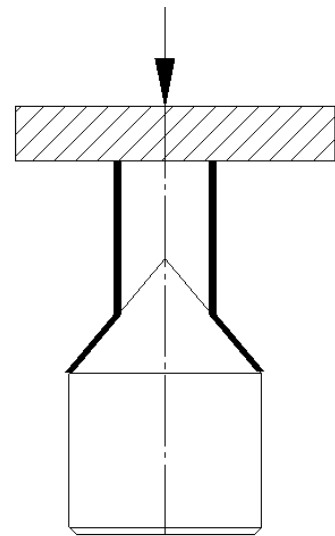


Obr. 12 Schéma s pohyblivým trnem [17]



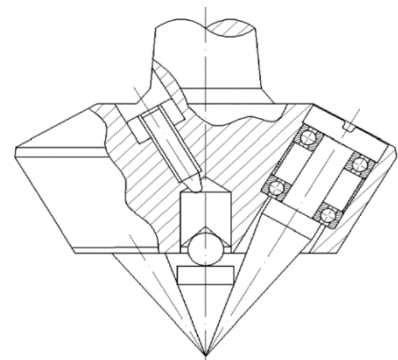
Obr. 13 Přípravek na rozšiřování [17]

- S nepohyblivým trnem – na jednom konci trubky je nasazena tlaková příruba, přes kterou je trubka postupně nasouvána na trn. Takto lze velice snadno pozorovat průběh tváření a případně jej korigovat. Dané rozšíření konce trubky je závislé na vrcholovém úhlu trnu a velikosti posunu beranu lisu.



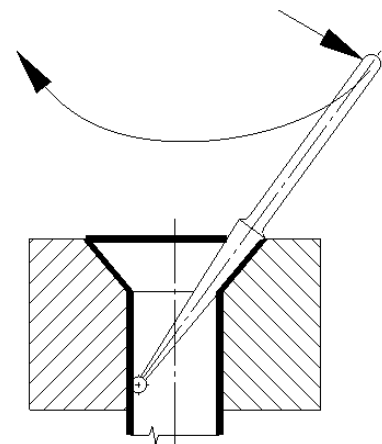
Obr. 14 Schéma s nepohyblivým trnem [17]

- S rotujícím trnem – trubka je upnuta v matrici s kuželovým hrdlem. Nástrojem je speciální rozválcovací trn, který může být upnut ve vrtačce nebo v upraveném soustruhu. Principem je působení tlaku za současné rotace nástroje na tvářenou trubku. Výhodou je možnost využití běžných konvenčních strojů, naopak nevýhodou je z důvodu užití matrice složité měření pomocí optických systémů.



Obr. 15 Schéma s rotujícím trnem [10]

- Ruční – nejjednodušší ale také nejméně přesný způsob. Trubka je nasazena do matrice s kuželovým hrdlem a její konec je postupně rozválcován za pomoci krouživého pohybu nástroje. Tím je páka s kuželovým tělem na konci opatřena sférickou plochou.



Obr. 16 Schéma s ruční pákou [17]

1.3.1 Zhodnocení navržených metod

V předešlé kapitole jsou stručně popsány teoreticky možné technologie, které by mohly být použité v rámci optimalizace výroby, jejíž podstatou se tato práce zabývá. Obecně lze říci, že spektrum metod, u kterých by se dalo uvažovat o jejich užití pro danou výrobu je větší, nicméně výše navržené metody byly vybrány na základě největších předpokladů jejich vhodnosti.

I přes tuto velkou selekci mají vybrané metody vedle nesporných výhod také nevýhody, které jsou pro danou výrobu součástí zásadní. Jejich sumarizací s ohledem na dva velice významné faktory jako jsou výrobní možnosti dané firmy a předpokládané výrobní množství, je pak možné zvolit tu nejvíce vhodnou a efektivní metodu výroby.

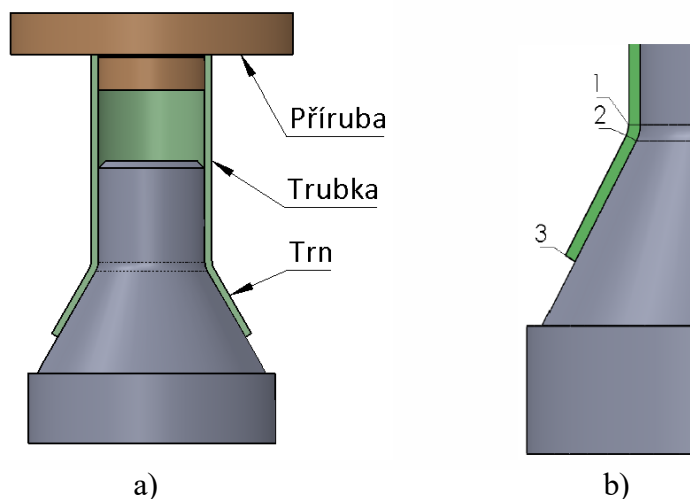
Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1, průměr tvářeného dílce se pohybuje v rozmezí 200 – 500 mm s tloušťkou stěny 8 – 13 mm, proto je třeba pro vybrání ideální varianty technologie vzít takovou konstrukci dílu v potaz. Z tohoto důvodu jsou z výše navržených nejméně vhodné metody hydroforming a vypínání nepevným nástrojem. Na tváření požadovaného tvaru, by totiž bylo třeba vyvinout velký tlak kapaliny stejně jako tlak lisovníku na pryž. Matrice by vždy musela být navržena dle tvaru požadovaného výrobku a zároveň by po vyjmutí musel být dílec ještě obroben, čímž by se celá výroba jen prodražovala. Metoda magneticko – impulzního tváření je obecně vhodnější pro větší výrobní série. Pro výrobu dílců s velkou variabilitou rozměrů a tvarů by bylo potřeba i odpovídající množství cívek daných konstrukcí, což by při daném objemu 150 – 200 ks/rok a s přihlédnutím k pořizovací a provozní ceně zařízení nebylo ekonomicky výhodné. Nejnovější experimentální metoda rotujícího nástroje, se na první pohled jeví jako vhodná, jelikož lze využít běžný konvenční soustruh (čímž firma disponuje) a tím odpadají pořizovací náklady. Nicméně princip je založen na najždění nástroje na základní materiál upnutý v čelistech, což vytváří reakční síly, které by se přenášely do ústrojí stroje. Na takové experimentování výdrže strojů při dané konstrukci dílce nemá firma zájem a ani finance. Poslední metodou, která byla v kapitole 1.3 popsána, byla technologie rozšiřování konců trubek, jejíž provedení má více možností. Vzhledem k finálnímu výrobku, jehož konstrukce a velikost kuželovitého rozšíření se mění v závislosti na požadavcích zákazníka, ale také s přihlédnutím k výrobním možnostem společnosti, se jako nejideálnější varianta pro optimalizaci současné výroby vložky chladiče jeví rozšiřování konců trubek nepohyblivým trnem (obr. 14). Proto bude následující část bakalářské práce na tuto problematiku zaměřena.

2 TECHNOLOGIE ROZŠÍŘOVÁNÍ KONCŮ TRUBEK [17], [19], [22], [23], [24]

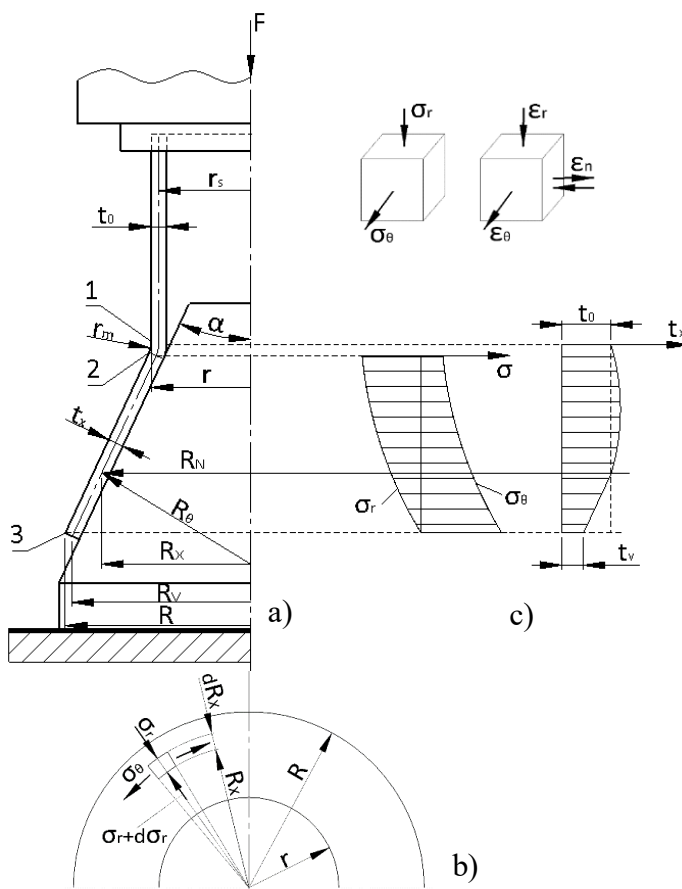
Na základě rozvahy provedené v předchozí kapitole byla jako nejvhodnější metoda výroby vložky chladiče zvolena technologie rozšiřování konců trubek s nepohyblivým kuželovým trnem. U této technologie je uvažován proces tváření za studena a za kvazistatických podmínek. Princip je zobrazen na obr. 17 a). Pomocí beranu lisu je vyvozena síla působící na přítláčnou přírubu, přes kterou je polotovár – trubka, postupně nasouvána na kuželový trn. Geometrie trnu, respektive jeho vrcholový úhel, tedy určuje výsledný tvar kuželového rozšíření. Během tohoto tvářecího procesu je přítláčná síla proměnlivá a závisí zejména na hodnotě deformačního odporu materiálu, jehož velikost je během procesu tváření ovlivňována zejména velikostí změny výchozího průměru trubky na konečný, třením na stykových plochách, poloměrem ohybu, rychlostí a teplotou tváření.

Samotné rozšíření probíhá v ohnisku deformace, jenž se nachází mezi body 1 až 3 znázorněné na obr. 17 b). Proces tváření se skládá ze dvou fází, a to ohybu, jenž je uskutečněn mezi body 1 a 2 a tvorby kuželového hrdla, které se nachází mezi body 2 až 3.

Na obr. 18 a) jsou popsány základní rozměry trubky a jejího kuželovitého rozšíření. Dále je zde zobrazen napětový a deformační stav, který se vyskytuje v materiálu během procesu tváření. Tento stav je uvažován na elementu, jenž je definovaný poloměrem R_θ (kolmý na povrchu kužele). Na obr 18 b) je zobrazen průmět ohniska deformace, který je vymezen poloměry r a R . Obr. 18 c) potom znázorňuje průběh napětí a změny tloušťky stěny. Při tomto procesu tváření se uvažuje s biaxiálním stavem napjatosti, jehož definují dvě napětí, radiální σ_r a obvodové σ_θ .



Obr. 17 Schéma principu rozšiřování [19]



Obr. 18 Schéma principu rozšiřování [17]

2.1 Stanovení potřebné síly [17], [19], [22]

Hlavním cílem teoretických výpočtů je stanovit sílu, která bude působit na přítlačnou přírubu. K tomuto výpočtu je potřeba znát hodnotu celkového deformačního odporu v bodě 1 (viz obr. 18), jehož hodnota je dána součtem jednotlivých složek napětí působící v daném průřezu.

$$(\sigma_d)_T = \sigma_r + \sigma_f + \sigma_o \quad (2.1)$$

kde: σ_r – radiální napětí [MPa]
 σ_f – napětí způsobené třením [MPa]
 σ_o – ohybové napětí [MPa]

Rozhodujícím faktorem pro řešení celkového deformačního odporu, který je způsobený přítlačnou silou, je hodnota radiálního napětí. Pro stanovení působících napětí při rozšiřování (zužování) průřezu osově symetrických součástí jsou využívány rovnice silové rovnováhy vztahené k určitému biaxiálně zatíženému elementu. Takovýto obecný element je zobrazen na obr. 20.

Rovnovážná rovnice vnějších a vnitřních sil působících v normálovém směru k povrchu elementu je dána:

$$\sigma_n \cdot S_3 - 2\sigma_r \cdot S_1 \cdot \frac{d\alpha}{2} - 2\sigma_\theta \cdot S_2 \cdot \frac{d\nu}{2} = 0 \quad (2.2)$$

kde: σ_n – normálové napětí [MPa]
 σ_θ – obvodové napětí [MPa]
 d_α, d_ν – úhly výsečí elementu [°]
 S_1, S_2, S_3 – plochy elementu [mm²]

Řešení této rovnice vede k tzv. Laplace-ově rovnici rovnováhy napětí, která vyjádřena vztahem (2.3).

$$\frac{\sigma_n}{t_0} - \frac{\sigma_r}{R_r} - \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} = 0 \quad (2.3)$$

kde: t_0 – počáteční tloušťka stěny trubky [mm]
 R_r – poloměr křivky v meridiálním směru [mm]
 R_θ – poloměr křivky v obvodovém směru [mm]

V meridiálním směru je bráno v úvahu tření mezi stykovými plochami nástroje a základního materiálu, z čehož vyplývá vztah silové rovnováhy:

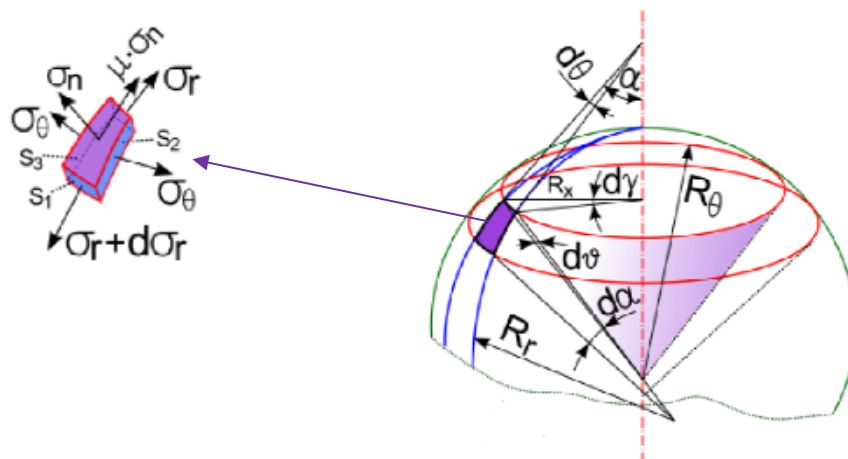
$$(\sigma_r + d\sigma_r) \cdot S_1 - \sigma_r \cdot S_1 - 2\sigma_\theta \cdot S_2 \cdot \frac{d\theta}{2} - \mu \cdot \sigma_n \cdot S_3 = 0 \quad (2.4)$$

kde: μ – koeficient tření [-]
 d_θ – úhel výseče elementu [°]

Úpravou rovnice vzejde:

$$R_x \frac{d\sigma_r}{dR_x} + \sigma_r - \sigma_\theta - \frac{\mu \cdot R_x}{\sin \alpha} \cdot \left(\frac{\sigma_r}{R_r} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0 \quad (2.5)$$

kde: R_x – poloměr radiální křivky elementu [mm]

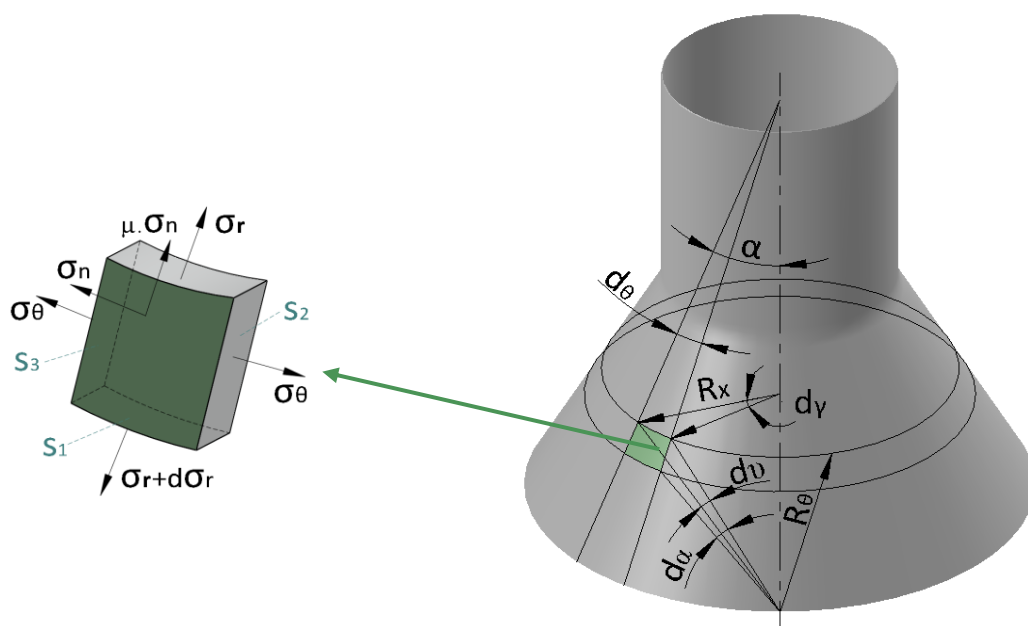


Obr. 19 Schéma geometrie obecného elementu [19]

Výše uvedené vztahy (2.3) a (2.5) jsou specifikovány vzhledem k obecnému elementu znázorněnému na obr. 19. Nicméně problematika řešená v této práci se zabývá rozšířením do kužele, kde nastává jedna podstatná změna, a to v případě poloměru R_r . Jelikož povrch kužele má v meridiálním směru rovinný tvar (viz obr. 20), takže lze říci, že $R_r = \infty$. Vzhledem k této skutečnosti je možno dané rovnice zjednodušit na:

$$\frac{\sigma_n}{t_0} = \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \quad (2.6)$$

$$R_x \frac{d\sigma_r}{dR_x} + \sigma_r - \sigma_\theta - \frac{\mu \cdot R_x \cdot \sigma_n}{t_0 \cdot \sin \alpha} = 0 \quad (2.7)$$



Obr. 20 Schéma geometrie kuželového elementu

Aplikováním zákona plasticity $\sigma_\theta - \sigma_r = \sigma_k$ lze úpravou rovnic (2.6) a (2.7) získat vzorce pro výpočet hlavních napětí, a to obvodového a radiálního:

$$\sigma_\theta = \sigma_k \cdot \left\{ 1 - \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{R_x}{R_v} \right)^{\mu \cdot \cot \alpha} \right] \right\} \quad (2.7)$$

$$\sigma_r = -\sigma_k \cdot \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{R_x}{R_v} \right)^{\mu \cdot \cot \alpha} \right] \quad (2.8)$$

kde: σ_k – mez kluzu [MPa]
 R_v – střední poloměr největšího místa rozšíření [mm]

Jak je zmíněno výše, určující pro výpočet celkového deformačního odporu je radiální napětí. Toto napětí má tlakový charakter (záporné hodnoty vychází z 2.8) a jeho maximum se nachází na poloměru $R_x = r$, jak je znázorněno na schématu na obr. 18.

Pro výpočet deformačního odporu je třeba vzít v úvahu deformační zpevnění materiálu, díky kterému se velikost napětí a deformace mění, a to zejména mezi body 2 a 3 (obr. 18) kuželového rozšíření. Tohoto se docílí nahrazením hodnoty meze kluzu σ_k v rovnici (2.8) střední hodnotou přirozeného deformačního napětí (PDN). S využitím lineární aproximace lze obecný vztah pro PDN vyjádřit ve tvaru:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{ke} + \bar{D} \cdot \varepsilon_\theta \quad (2.9)$$

kde: $\bar{\sigma}$ – střední hodnota PDN [MPa]
 ε_θ – deformace v obvodovém směru [-]
 \bar{D} – modul zpevnění [MPa]
 σ_{ke} – extrapolovaná mez kluzu [MPa]

Hodnotu modulu zpevnění a extrapolované meze kluzu lze určit z následujících vztahů:

$$\bar{D} = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n \quad (2.10)$$

$$\sigma_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n \quad (2.11)$$

kde: K – materiálová konstanta [MPa]
 n – exponent deformačního zpevnění [-]

Pro stanovení střední hodnoty PDN je nutné si uvědomit, že na začátku kuželové části (bod 2 na obr. 18), kde $R_x = r$ platí, že $\varepsilon_\theta = 0$. Při vložení této nulové hodnoty do vztahu (2.9) vznikne první okrajová aproximační rovnice:

$$(\bar{\sigma})' = \sigma_{ke} \quad (2.12)$$

Druhá okrajová aproximační rovnice je vztažena k bodu 3 na obr. 18., kde $R_x = R_v$. V tomto místě vykazuje obvodová deformace maximální hodnoty dané vztahem (2.13) a následným dosazením do vztahu (2.9) potom vznikne rovnice (2.14):

$$(\varepsilon_\theta)_{max} = \frac{R_v - r}{r} \quad (2.13)$$

$$(\bar{\sigma})'' = \sigma_{ke} + \bar{D} \cdot \left(\frac{R_v - r}{r} \right) \quad (2.14)$$

kde: r – vnější poloměr trubky [mm]

Jednoduchou rovnicí se vyjádří střední hodnota přirozeného deformačního napětí $(\bar{\sigma})_{mid}$:

$$(\bar{\sigma})_{mid} = \frac{(\bar{\sigma})' + (\bar{\sigma})''}{2} \quad (2.15)$$

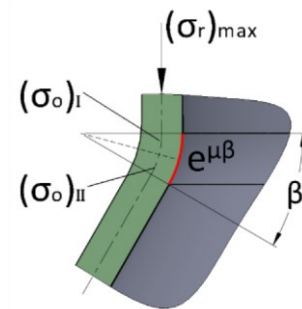
Po dosazení vztahů (2.12) a (2.14) do výše uvedené obecné rovnice (2.15) se získá vztah:

$$(\bar{\sigma})_{mid} = \sigma_{ke} + \frac{\bar{D}}{2} \cdot \left(\frac{R_v - r}{r} \right) \quad (2.16)$$

Tato střední hodnota $(\bar{\sigma})_{mid}$ se následně dosadí do vztahu (2.8) namísto hodnoty σ_k a pro přetvořenou oblast danou poloměry $r - R_v$ nabývá pak rovnice pro maximální hodnotu radiálního napětí finální tvar:

$$(\sigma_r)_{max} = \left[\sigma_{ke} + \frac{\bar{D}}{2} \cdot \left(\frac{R_v - r}{r} \right) \right] \cdot \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R_v} \right)^{\mu \cdot \cot \alpha} \right] \quad (2.17)$$

Výše uvedeným vztahem se získala jedna ze složek výpočtu celkového deformačního odporu uvedeném ve vztahu (2.1). Další složkou je ohybové napětí, jehož schéma je znázorněno na obr. 21. Skládá se ze dvou částí, kde $(\sigma_o)_I$ se vztahuje k ohybu a $(\sigma_o)_{II}$ zahrnuje následné napřimování ohnuté části. Celkové ohybové napětí lze zapsat:



Obr. 21 Schéma ohybových napětí [19]

$$(\sigma_o)_I + (\sigma_o)_{II} = \frac{\sigma_k \cdot t_o}{2 \cdot r_m + t_o} \quad (2.18)$$

kde: r_m – vnější poloměr ohybu [mm]

$(\sigma_o)_I$ – napětí v ohybu [MPa]

$(\sigma_o)_{II}$ – napětí v napřimování [MPa]

Jako poslední zbývající složku, kterou je třeba zahrnout do výpočtu celkového deformačního odporu je vliv tření. Vyskytuje se na kontaktní ploše nástroje a trubky, a to konkrétně mezi body 1 - 3 uvedenými na obr. 17 b). Ve výpočtu maximálního radiálního napětí byl již zahrnut vliv tření mezi body 2 – 3, takže toto dále není třeba uvažovat. V místě ohybu, mezi body 1 – 2, se vyskytuje tzv. pásové tření, které je dané parametrem $e^{\mu\beta}$. Obecně se dá předpokládat jeho vliv na jednotlivé složky celkového deformačního odporu:

$$(\sigma_d)_T = [(\sigma_r)_{max} + (\sigma_o)_I + (\sigma_o)_{II}] \cdot e^{\mu\beta} \quad (2.19)$$

kde: e – Eulerovo číslo [-]

β – úhel opásání [rad]

S uvážením rovnic (2.17), (2.18) a (2.19) lze pak celkový deformační odpor (2.1) vyjádřit:

$$(\sigma_d)_T = \left\{ \left[\sigma_{ke} + \frac{\bar{D}}{2} \cdot \left(\frac{R_v - r}{r} \right) \right] \cdot \left[\left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{R_v} \right)^{\mu \cdot \cot \alpha} \right) \right] + \left(\frac{\sigma_k \cdot t_o}{2 \cdot r_m + t_o} \right) \right\} \cdot e^{\mu\beta} \quad (2.20)$$

Jak je zmíněno výše, potřebná tvářecí síla musí odpovídat celkovému deformačnímu odporu, který je vztažen k bodu 1 (obr. 17). Z obecného tvaru je známo, že síla je vyjádřena jako napětí (tlak) na plochu:

$$F = (\sigma_d)_T \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot t_o \quad (2.21)$$

kde: r_s – střední poloměr trubky [mm]
 F – potřebná tvářecí síla [N]

2.2 Stanovení konečné tloušťky [8], [17], [22]

Výpočet konečné tloušťky stěny trubky je důležité zejména z důvodu zajištění, že při tvářecím procesu nedojde k přílišnému ztenčení. Dle rovnic známých z teorie plasticity a na základě předpokladů biaxiálního stavu napjatosti lze uvažovat vztah:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} = \frac{d\varepsilon_r - d\varepsilon_n}{d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_n} \quad (2.22)$$

kde: $d\varepsilon_r$ – přírůstek deformace v radiálním směru [-]
 $d\varepsilon_n$ – přírůstek deformace ve směru tloušťky [-]
 $d\varepsilon_\theta$ – přírůstek deformace v obvodovém směru [-]

Pro účelné zjednodušení pravé strany rovnice se použije vztah zákona o zachování objemu (2.23), který se dosadí do rovnice (2.22), čímž se získá obecný vztah (2.24):

$$d\varepsilon_r = -d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_n \quad (2.23)$$

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} = -\frac{d\varepsilon_\theta + 2d\varepsilon_n}{d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_n} \quad (2.24)$$

Za účelem získání poměru přírůstků deformace v normálovém směru $d\varepsilon_n/d\varepsilon_\theta$, je možno vztah (2.24) upravit na vhodnější tvar:

$$d\varepsilon_n = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta} \cdot (d\varepsilon_\theta) \quad (2.25)$$

Dále je možné nahradit přírůstky deformací skutečným přetvořením, kdy $d\varepsilon_n = \varphi_n$ a $d\varepsilon_\theta = \varphi_\theta$. Jelikož při tomto tvářecím procesu dochází k rozšiřování průřezu, tak vzhledem k zákonu o zachování objemu lze vyvodit, že tloušťka stěny se bude zmenšovat a obvod zvětšovat. Deformace φ_n bude tedy záporná a deformace φ_θ kladná, což lze vyjádřit vztahy:

$$\varphi_n = \ln \frac{t_0}{t_x} \quad (2.26)$$

$$\varphi_\theta = \ln \frac{R_x}{r} \quad (2.27)$$

kde: t_x – tloušťka trubky v obecném bodě [mm]

Dosazením vztahů (2.26) a (2.27) do rovnice (2.25) vznikne tedy rovnice:

$$\ln \frac{t_0}{t_x} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta} \cdot \ln \frac{R_x}{r} \quad (2.28)$$

Po úpravě rovnice (2.28) bude odvozeno:

$$\ln \frac{t_0}{t_x} = \ln \left(\frac{R_x}{r} \right)^{\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta}} \quad (2.29)$$

Po odlogaritmování a úpravě výše uvedeného vztahu se získá konečný tvar rovnice pro výpočet tloušťky stěny v místě poloměru R_x .

$$t_x = t_0 \cdot \left(\frac{r}{R_x} \right)^{\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r - 2\sigma_\theta}} \quad (2.30)$$

Důležitým faktorem je také zjištění minimální tloušťky stěny t_v , která se vypočítá za pomoci tzv. koeficientu rozšiřování k_r :

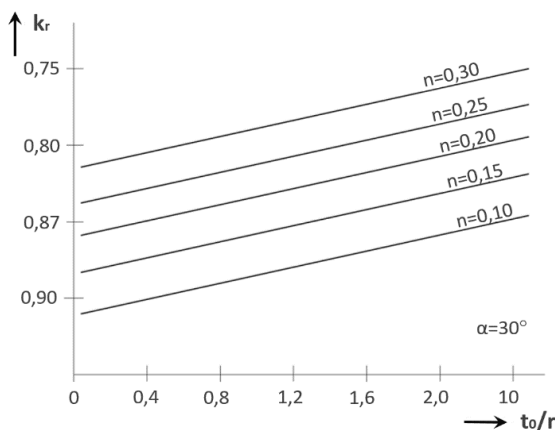
$$k_r = \frac{r_s}{R_v} \quad (2.31)$$

$$t_v = t_0 \cdot \sqrt{\frac{r_s}{R_v}} = t_0 \cdot \sqrt{k_r} \quad (2.32)$$

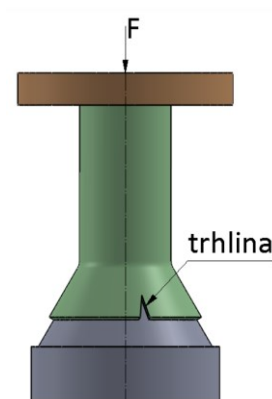
2.3 Technologické limity [17], [24]

Samotný proces metody rozšiřování má určité technologické limity, po jejichž překročení dochází ke vzniku níže uvedených defektů.

- Vznik trhliny na hraně trubky – nejčastěji se vyskytuje na poloměru R_v , jak je znázorněno na obr. 23. Její iniciace je ovlivněna několika faktory jako například výrazné ztenčení stěny, jakost povrchu čela trubky (horší jakost = větší pravděpodobnost výskytu vrubu), přítomnost jednoosé, tahové napjatosti, viz obr. 18 c), nebo hodnota koeficientu rozšíření k_r . Tento defekt lze teoreticky předpovědět na základě diagramů vytvořených pro dané podmínky. Právě určení kritické hodnoty koeficientu k_r lze určit z diagramu na obr. 22, kde jednotlivé křivky tuto kritickou hodnotu představují pro danou poměrnou tloušťku t_0 / r . Diagram je zkonstruován pro jednostranný úhel $\alpha = 30^\circ$ a vliv materiálu zohledňuje exponent deformačního zpevnění n .



Obr. 22 Kritické hodnoty k_r [17]



Obr. 23 Vyznačení trhliny [17]

Koeficientem k_r lze také charakterizovat obvodovou deformaci ε_θ . Mezní hodnota obvodové deformace nastává v okamžiku, kdy je poloměr R_v tak velký, že je na hraně trubky dosaženo obvodového napětí odpovídající mezi pevnosti materiálu. Tuto deformaci lze definovat jako:

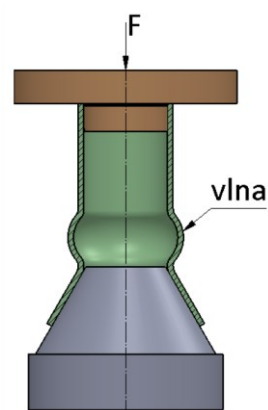
$$\varepsilon_\theta = \frac{R_v - r_s}{r_s} = \frac{1 - k_r}{k_r} \quad (2.33)$$

V případě, kdy obvodové napětí ε_θ odpovídá jeho mezní hodnotě ε_m , které tak definuje poměrné prodloužení na mezi pevnosti materiálu, lze vyjádřit mezní neboli kritickou hodnotu koeficientu rozšiřování ve tvaru:

$$k_r = \frac{1}{1 + \varepsilon_m} \quad (2.34)$$

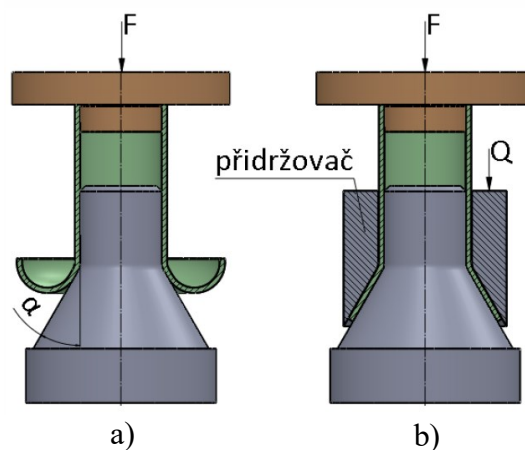
kde: ε_m – poměrné prodloužení na mezi pevnosti [-]

- Ztráta vzpěrné stability – projevuje se vznikem příčné vlny zobrazené na obr. 24. Počátek zvlnění nastává nejčastěji na válcové části trubky v bodě 1 (obr. 17), kde deformační odpor dosahuje maximálních hodnot. Na velikosti těchto hodnot má hlavní vliv radiální napětí, proto je vhodné, aby v tomto bodě velikost $(\sigma_r)_{max}$ nepřesáhla mez kluzu. V opačném případě dojde ke vzniku vlny, jelikož deformační odpor pro tvorbu kužele je větší než odpor trubky proti vzniku vlny.



Obr. 24 Vyznačení vlny [17]

- Zpětné zakroužení konce trubky – vada se projevuje odchýlením materiálu od trnu, jak je znázorněno na obr. 25 a). Jak bylo zjištěno mnoha experimenty provedenými různými autory, defekt nastává zejména při hodnotě polovičního vrcholového úhlu $\alpha > 55^\circ$. Eliminovat tento jev lze za pomoci přidržovače, viz obr. 25 b), nicméně u speciálních dílů je takové zakroužení konce trubky dokonce žádoucí.



Obr. 25 Vyznačení zakružování [17], [24]

3 NÁVRH POSTUPU VÝROBY

Tato kapitola pojednává o návrhu postupu výroby dílce s požadovanými rozměry dle obr. 26. Polotovarem je bežešvá trubka, ocel 15 313 (ekvivalent EN 10216-2 10CrMo9-10, ASTM A-335 P22). Materiálový list je uveden v příloze č. 2.

Aby výroba vybranou metodou rozšiřování byla možná, je třeba nejdříve ověřit její funkčnost po teoretické stránce. To se provede prostřednictvím analytických výpočtů dle kapitoly 2 s dosazením reálných parametrů dané součásti a užitého materiálu. Takto získané výsledky se pak porovnají se simulací MKP (metoda konečných prvků). Tímto se získají data k porovnání od dvou na sobě nezávislých zdrojů, kde v případě přibližné shody výsledků je velká pravděpodobnost, že získané výsledky jsou správné a budou odpovídat reálnému procesu tváření dané součásti. Na základě provedené simulace si lze vytvořit představu o samotném průběhu tváření dané součásti, vyhodnotit přetvárnou sílu a predikovat riziko vzniku defektu trhliny. Výpočtem dle vztahů uvedených v kapitole 2 lze odhadnout vznik defektů trhliny a ztráty vzpěrné stability, ale také získat hodnotu potřebné přetvárné síly, která je velmi důležitá pro volbu vhodného stroje. Firma disponuje strojem OMCN 64 a plánuje tento stroj uvolnit na případnou výrobu zadané součásti. V první řadě je tedy nutné ověřit, zda je tento stroj na danou výrobu vhodný, což bude provedeno porovnáním vypočtených či simulací získaných hodnot s parametry daného stroje.

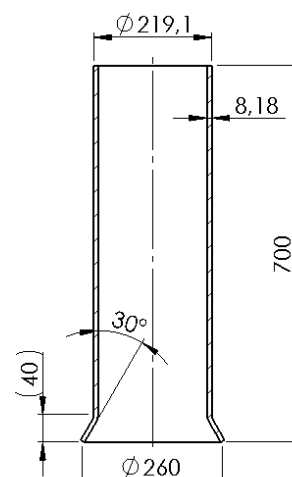
Stroj OMCN 164 je elektro-hydraulický lis s nominální silou 1000 kN a pracovním zdvihem 1055 mm zobrazený na obr. 27. Další parametry stroje jsou uvedeny v příloze 4.

Aby bylo možné začít s analytickými výpočty a MKP simulací, je nejprve nutné zjistit mechanické vlastnosti daného materiálu, což se provede za pomoci tahové zkoušky. Vyhodnocením této zkoušky se získají nejen základní materiálové charakteristiky, ale i další parametry jako exponent deformačního zpevnění n a materiálová konstanta K potřebné k výpočtům.

3.1 Experimentální ověření mechanických vlastností - tahová zkouška [8]

Tahová zkouška materiálu představuje nejdůležitější základní materiálový rozbor. Slouží pro posouzení plasticity materiálu, čímž lze teoreticky předpovědět vlastnosti materiálu pro technologii tváření.

Princip spočívá v jednoosém namáhání zkoušeného vzorku. Ten je pevně upnutý do kleštin hydraulického trhacího stroje, který postupným tahovým zatížením způsobuje deformaci vzorku obvykle až do okamžiku porušení vzorku (vznik lomu). Nicméně způsobu provedení tahové zkoušky je několik a výběr ideální metody závisí na tom, jaké výstupní veličiny jsou od zkoušky požadovány.



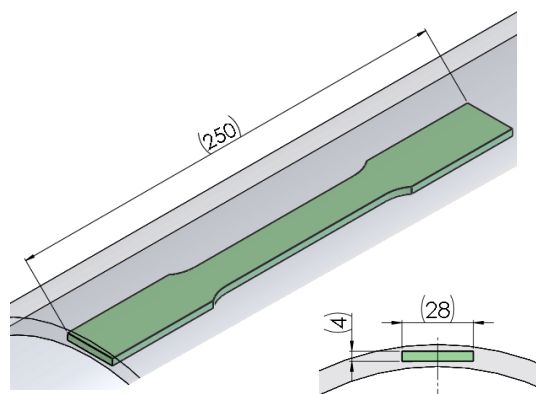
Obr. 26 Schéma finálního výrobku



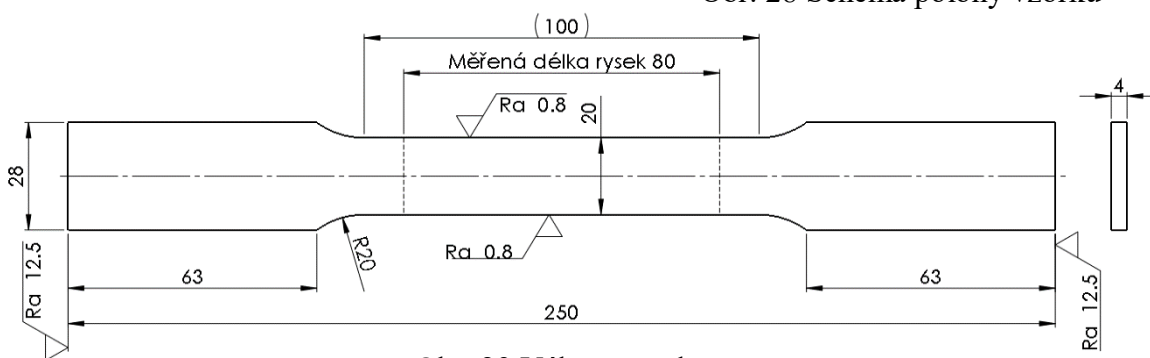
Obr. 27 Elektro-hydraulický lis OMCN 164 [28]

3.1.1 Výroba a geometrie zkušebních vzorků [10]

Jak bylo popsáno výše, polotovary vyráběného dílce je bezešvá trubka. Zkušební vzorky byly odebrány přímo ze stěny této trubky podél směru vláken, tak jak je znázorněno na obr. 28. Výroba byla provedena na CNC obráběcím centru HAAS VF 6. Navržené rozměry vycházely z normy ČSN EN 10002-1. Na obr. 29 jsou zobrazeny parametry zkušebního vzorku.

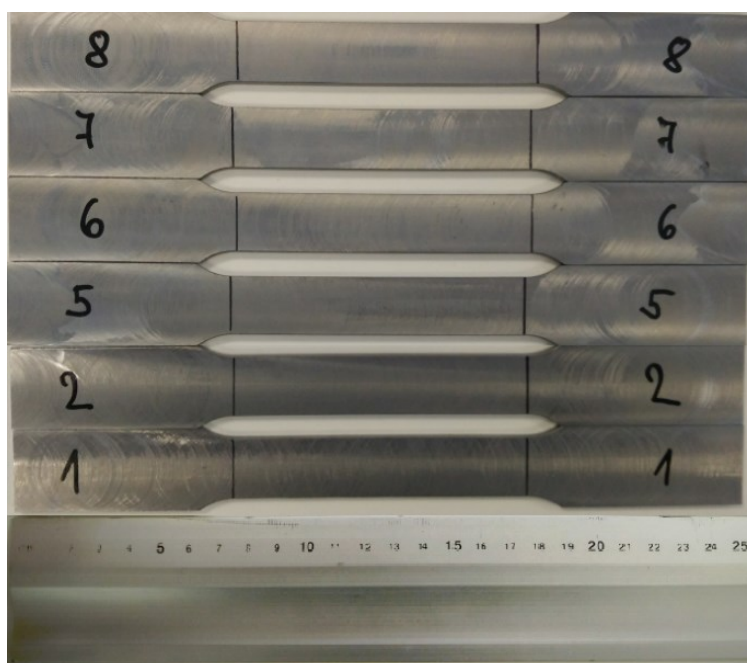


Obr. 28 Schéma polohy vzorku



Obr. 29 Výkres vzorku

Celkem bylo odebráno 8 vzorků. Ty byly přeměřeny mezioperační kontrolou a porovnány s rozměry a požadovanou strukturou povrchu dle výkresu. Z těchto vzorků jich 6 vyhovovalo požadavkům. Ty byly číselně označeny a informativně opatřeny spojnicí začátků oblouků tak, aby byla jasně definována rovná plocha pro narýsování měřené délky pomocí rysek. Vzorky jsou zobrazené na obr. 30.



Obr. 30 Vzorky před zkouškou

3.1.2 Parametry zkušebního stroje

Tahová zkouška byla provedena pomocí hydraulického zkušebního stroje ZD40, obr. 31. Tento stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů až do lisovací síly 400 kN. Stroj je vybaven délkovým snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60. Ta je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC a bez použití průtahoměru. Komunikace s PC probíhá pomocí sériového rozhraní RS 232. PC je vybaven programem M-TEST pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2. Výsledné vyhodnocení je zpracováno graficky. Zkouška proběhla v laboratořích odboru technologie tváření kovů a plastů na FSI VUT v Brně, kde je také tento stroj umístěn. Jeho podrobnější technické parametry jsou uvedeny v příloze č. 1.



Obr. 31 Hydraulický trhací stroj ZD40

3.1.3 Průběh tahové zkoušky

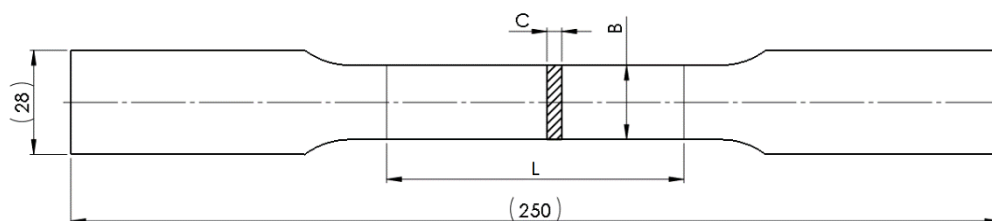
Způsob provedení tahové zkoušky závisel na typu hlavních veličin, které bylo třeba vyhodnocením získat. Těmi základními ukazateli byly mez pevnosti R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, tažnost A a kontrakce Z . Pro získání těchto základních hodnot byla provedena zkouška do přetržení, a to u vzorků č. 1 a 2. Dalším významným ukazatelem tvárnosti je exponent deformačního zpevnění n a materiálová konstanta K . Pro jejich získání byla zvolena vyhodnocovací metoda vícebodová, což je obdoba dvoubodové, jen s více vyhodnocenými elementy. Tato zkouška byla provedena na vzorcích č. 5 a 8 a bude detailně rozebrána v kapitole 3.1.4.

Obecný průběh zkoušky byl následující. U všech vzorků byla změřena tloušťka C_0 a šířka B_0 měrné části a narysovány rysky vymežující měrnou délku L_0 , viz obr. 33. Hodnoty těchto tří veličin byly zapsány do tab. 3. Detailní nastavení a obsluha PC programu M-TEST byla plně v kompetenci pracovníků odboru technologie tváření kovů a plastů. Vzorky č. 1 a 2 se jednotlivě upnuly do kleštin (obr. 32) a postupným tahovým zatěžováním byly deformovány až do vzniku lomu. Během zatěžování byla snímána velikost síly F a dráhy pojezdu příčnicku stroje s . Na základě těchto hodnot byla vytvořena tzv. pracovní křivka neboli pracovní diagram závislosti $F = f(s)$, viz obr. 35.



Obr. 32 Upnutí vzorku do kleštin

Po dokončení všech zkoušek byly výše uvedené důležité veličiny L , B , C u vzorků opět přeměřeny a zapsány do tab. 4.



Obr. 33 Náčrt měřených veličin

Tab. 3 Původní hodnoty vzorků.

Původní hodnoty			
číslo	Lo [mm]	Bo [mm]	Co [mm]
1	80,00	20,25	3,82
2	80,00	20,15	3,95
3	nevyhodnoceno		
4	nevyhodnoceno		
5	80,00	20,15	3,90
6	80,00	20,08	4,00
7	80,00	20,00	3,95
8	80,00	20,10	3,93

Tab. 4 Hodnoty vzorků po zkoušce.

Hodnoty po zkoušce				
číslo	Stav	L [mm]	B [mm]	C [mm]
1	do přetržení	97,60	14,75	2,80
2	do přetržení	97,72	14,80	2,70
3	nevyhodnoceno			
4	nevyhodnoceno			
5	dráha 8 mm (za $R_{p0.2}$)	82,28	19,70	3,80
6	dráha 12 mm	84,12	19,40	3,80
7	dráha 16 mm	87,60	19,05	3,70
8	dráha 19 mm (před R_m)	89,70	18,80	3,64

U všech vzorků zkouška proběhla bez problémů a dle očekávaného průběhu. Vzorky č. 1 a 2 byly podrobeny kompletní tahové zkoušce, u které došlo k přetržení vzorků, resp. k porušení tvárným lomem. U vzorků č. 5-8 byla provedená odstupňovaná tahová zkouška, kdy byl každý vzorek zatížen jinou tahovou silou danou příslušnou velikostí posunu příčnicku stroje. U každého vzorku došlo k zúžení průřezu a změně hodnoty měrné délky. Změřené hodnoty lze vidět v tab. 4 a konečný vizuální stav všech vzorků je zobrazen na obr. 34.

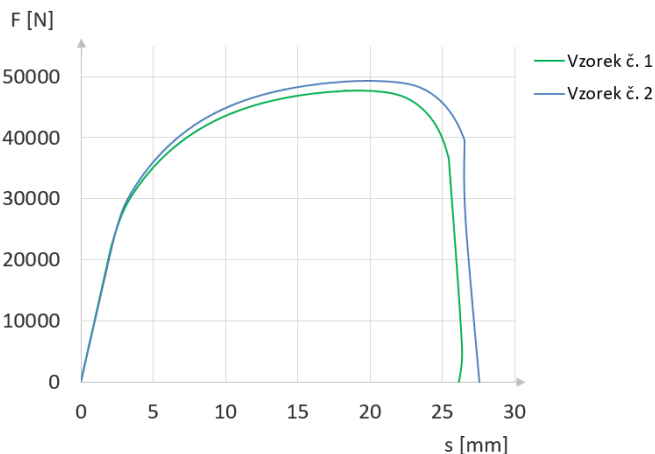


Obr. 34 Vzorky po zkoušce

3.1.4 Vyhodnocení jednotlivých metod [10], [29]

Jak bylo zmíněno výše, výsledkem každé zkoušky bylo zjištění velikosti síly F v závislosti na dráze příčniku s . Tato závislost byla vypsána pomocí souřadnic jakožto hlavními výstupními daty, které posloužily jako základní parametry pro vyhodnocení potřebných veličin pro obě provedené metody zkoušky.

a) Metoda do přetržení – z obdržných dat byl nejdříve sestaven graf pro vzorek č. 1 a 2. Vyčtením z grafu bylo patrné, že průběh síly a dráhy na počátku zatěžování nebyl konstantní. To bylo způsobeno vřemí v mechanismu stroje a zejména prodlením zakousnutí čelistí do vzorků. Tato nedokonalost byla vyřešena zjednodušením. Kolineárně se spustila přímka v elastické oblasti grafu, která protнула osu dráhy nástroje v určitém bodě, který



Obr. 35 Pracovní diagram závislosti síly na dráze příčniku

definoval dráhu, o kterou se celý graf posunul do bodu 0. Společný graf obou vzorků je znázorněn na obr. 35. Dle tohoto grafu nelze získat potřebné veličiny mechanických vlastností materiálu, a proto je třeba jej vyhodnotit na graf smluvní, který je stanoven na základě smluvních charakteristik napětí σ a poměrné deformace ε . Ty lze získat dle vztahů:

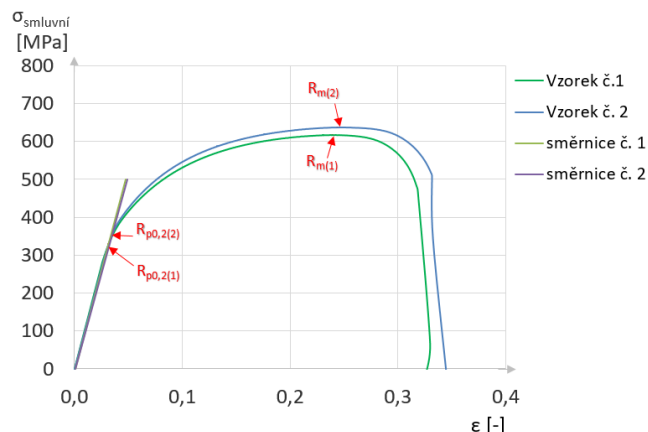
$$\sigma = \frac{F}{S_0} = \frac{F}{B_0 \cdot C_0} \quad (3.1)$$

kde: F – měřená tahová síla [N]
 B_0 – původní šířka vzorku [mm]
 C_0 – původní tloušťka vzorku [mm]
 S_0 – původní průřez vzorku [mm]

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (3.2)$$

kde: L – okamžitá (konečná) měrná délka [mm]
 L_0 – počáteční měrná délka [mm]

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ se určila bodem protnutí jednotlivých závislostí se smluvní směrnicí. Ta je rovnoběžná s přímkou v elastické oblasti s počátkem na ose poměrné deformace $\varepsilon = 0,002$, viz obr. 36. Hodnota meze pevnosti R_m je pak odečtena jako největší hodnota působícího tahového napětí.



Obr. 36 Smluvní diagram napětí- deformace

Dalšími veličinami, které se vyhodnocují je tažnost a kontrakce. Lze je vypočítat následovně:

$$A = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (3.3)$$

kde: A – tažnost [%]

$$Z = \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100 = \frac{(B \cdot C) - (B_0 \cdot C_0)}{(B_0 \cdot C_0)} \cdot 100 \quad (3.4)$$

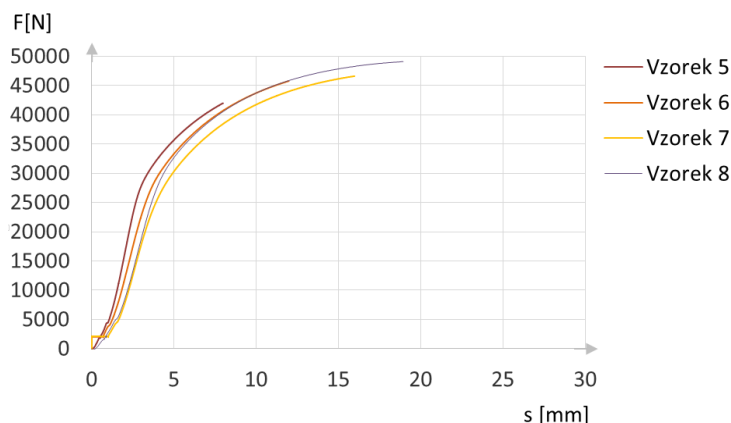
kde: Z – kontrakce [%]

Všechny vyhodnocené veličiny jsou pro oba vzorky uvedené v tab. 5.

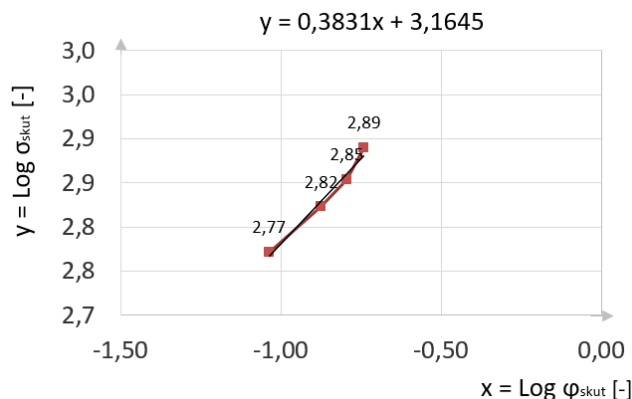
Tab. 5 Vyhodnocené veličiny pro vzorky č.1 a č.2.

číslo	mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	mez pevnosti R _m [MPa]	tažnost A [%]	kontrakce Z [%]
1	340	610	22,00	46,6
2	364	630	22,15	49,8

b) Metoda vícebodová – hlavním cílem této metody bylo získání veličin n a K . Provedením zkoušky do přetržení u vzorků č.1 a č.2 bylo zjištěno, že interval dráhy příčnicku od meze kluzu do meze pevnosti materiálu je mezi 5 mm a 21 mm. Proto se pro jednotlivé zatěžování vzorků definovala vzdálenost dojezdu příčnicku 8 mm pro vzorek č. 5, 12 mm pro vzorek č. 6, 16 mm pro vzorek č. 7 a 19 mm pro vzorek č. 8. Přičemž při pojezdu příčnicku o 8 mm byla bezpečně překročena smluvní mez kluzu a při dráze 19 mm ještě nebylo dosaženo meze pevnosti materiálu. Z toho vyplývá, že jednotlivé zkoušky byly provedeny v oblasti rovnoměrného přetvoření vzorků. Průběh zatěžování jednotlivých vzorků je vykreslen na obr. 37. Po dokončení zkoušky se jednotlivé vzorky proměřily. Měření konečné tloušťky stěny C a šířky vzorku B proběhlo



Obr. 37 Závislost tažné síly na dráze příčnicku



Obr. 38 Aproximace křivky

na 3 různých místech, a to v oblasti mezi ryskami, v tzv. měrné oblasti. Zprůměrované hodnoty byly zapsány do tab. 4, stejně tak jako změřená konečná měrná délka L . Tyto konečné hodnoty posloužily k vyjádření maximálních hodnot napětí a deformace u

jednotlivých vzorků, které bylo možno vynést do grafu $\text{Log } \sigma_{skut} = f(\text{Log } \varphi_{skut})$. Takto se získaly 4 body, které se proložily regresní křivkou. Dle její rovnice $\text{Log } \sigma_{skut} = n \cdot \text{Log } \varphi_{skut} + \text{Log } K$, se získaly požadované veličiny $n = 0,3831$ a po odlogaritmování $K = 1460,5 \text{ MPa}$. Graf s aproximací křivky a výslednou rovnicí je zobrazen na obr. 38.

3.1.5 Zhodnocení výsledků

Základní hodnoty mechanických vlastností dle atestovaného materiálového listu (viz příloha č. 3) jsou specifikovány v tab. 6. Porovnáním s vyhodnocenými hodnotami dle tab. 6 lze brát experimentálně získaná data za technicky přijatelná a dále tedy mohou být použita jako relevantní vstupní veličiny pro výpočetní ověření.

Tab. 6 Základní mechanické vlastnosti dle materiálového listu [4].

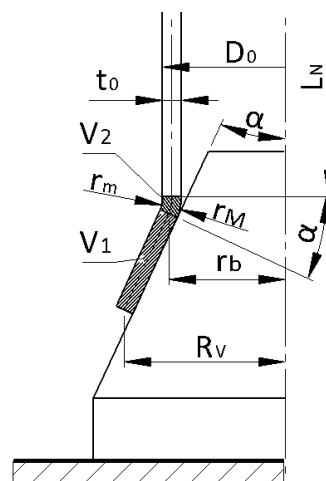
min. mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	mez pevnosti R_m [MPa]	tažnost A [%]
270-280	480-630	22,00

3.2 Stanovení délky polotovaru [8], [32]

Proces rozšíření konce trubky do kuželovitěho tvaru má za následek zkrácení celkové délky polotovaru. Aby byla zajištěna finální požadovaná délka součásti dle obr. 26, je třeba stanovit počáteční délku polotovaru. Schéma pro výpočet konečné délky je zobrazeno na obr. 39, jednotlivé vstupní hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Vstupní hodnoty pro výpočet délky polotovaru.

délka rovné části trubky	L_N	610 mm
střední poloměr nejširšího místa rozšíření	R_v	130 mm
počáteční průměr trubky	D_0	219,1 mm
počáteční tloušťka trubky	t_0	8,18 mm
vnitřní poloměr ohybu	r_m	65 mm
vnější poloměr ohybu	r_M	73 mm
polovina vrcholového úhlu	α	30°



Obr. 39 Schéma pro výpočet délky polotovaru

Při výpočtu délky je uvažován zákon zachování objemu materiálu, takže platí:

$$V_0 = V_K \quad (3.5)$$

kde: V_0 – počáteční objem tvářené části trubky [mm^3]
 V_K – konečný objem tvářené části trubky [mm^3]

Po vyjádření jednotlivých objemů, lze rovnici zapsat jako:

$$\frac{1}{4} \pi \cdot L_r \cdot [D_0^2 - (D_0 - 2t_0)^2] = V_1 + V_2 \quad (3.6)$$

kde: V_1 – objem ohybové části trubky [mm³]
 V_2 – objem rozšířené části trubky [mm³]
 L_r – potřebná délka rozšíření [mm]
 D_0 – počáteční průměr trubky [mm]

Pro výpočet objemů V_1 a V_2 je třeba nejdříve určit odpovídající poloměr konce ohybové části r_b dle vztahu:

$$r_b = \frac{D_0 - t_0}{2} + \left(r_m + \frac{t_0}{2}\right) \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (3.7)$$

$$r_b = \frac{219,1 - 8,18}{2} + \left(65 + \frac{8,18}{2}\right) \cdot (1 - \cos \alpha) = 114,7 \text{ mm}$$

Objem rozšířené části trubky je stanoven:

$$V_1 = \pi \cdot t_0 \cdot (R_v^2 - r_b^2) \cdot \frac{\text{tg} \cdot (90 - \alpha)}{\cos \alpha} \quad (3.8)$$

$$V_1 = \pi \cdot 8,18 \cdot (130^2 - 114,7^2) \cdot \frac{\text{tg} \cdot (90 - 30)}{\cos 30} = 192\,423 \text{ mm}^3$$

Objem ohybové části trubky je stanoven:

$$V_2 = \frac{\alpha \cdot 2}{360} \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{D_0}{2} + r_m\right) \cdot (R_m^2 - r_m^2) \quad (3.9)$$

$$V_2 = \frac{30 \cdot 2}{360} \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{219,1}{2} + 65\right) \cdot (73^2 - 65^2) = 316\,977 \text{ mm}^3$$

Výsledky rovnic (3.8) a (3.9) se dosadí do vzorce (3.6), ze kterého lze určit výslednou hodnotu délky rozšířené části L_r :

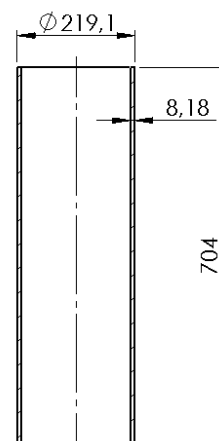
$$L_r = \frac{4 \cdot (V_1 + V_2)}{\pi \cdot [D_0^2 - (D_0 - 2 \cdot t_0)^2]} = \frac{4 \cdot (192423 + 316977)}{\pi \cdot [219,1^2 - (219,1 - 2 \cdot 8,18)^2]} = 93,98 \text{ mm}$$

Celková délka polotovaru L_c je pak součtem potřebné délky rozšíření L_r a délky rovné části trubky L_N . Hodnota rovné části trubky byla zpětně odečtena pomocí CAD systému z výsledku simulace MKP. Výsledný vztah pro celkovou délku:

$$L_c = L_r + L_N \quad (3.10)$$

$$L_c = 93,98 + 610 = 703,98 \text{ mm}$$

Dle výpočtů byla hodnota celkové délky polotovaru navržena 704 mm. Schéma rozměrů polotovaru je zobrazeno na obr. 40.



Obr. 40 Schéma rozměrů polotovaru

3.3 Početní ověření funkčnosti metody

Aby bylo možné přistoupit k samotné výrobě, je nutné nejdříve vybranou metodu rozšiřování nepohyblivým trnem výpočetně ověřit. Těmito výpočty bude získána jak potřebná přetvárná síla, tak i predikce možného vzniku vad při tváření, jak je popsáno v kapitole 2.3. Aby výsledné hodnoty byly co nejpřesnější, provede se toto ověření jak analyticky, tak pomocí simulace MKP. K oběma metodám jsou k dispozici získané vstupní veličiny z provedené tahové zkoušky.

3.3.1 Analytické výpočty

Jak bylo zmíněno v kap. 2.1, hlavním cílem teoretických výpočtů je stanovit přetvárnou sílu. K tomuto výpočtu je potřeba znát hodnotu celkového deformačního odporu v bodě 1. Pro zjištění těchto veličin je třeba nejdříve definovat všechna vstupní data. Ta vychází buď z vyhodnocení tahové zkoušky, geometrie konečného tvaru součásti, nebo volby parametrů na základě ověřených skutečností. Takovým parametrem, který byl zvolen, je součinitel tření μ . Jeho hodnota byla definována na základě doporučení odborníků odboru technologie tváření kovů a plastů na FSI VUT v Brně a také doporučením firmy Molykote zabývající se mazacími pastami, které budou použity ke snížení tření mezi nástrojem a materiálem při tvářecím procesu. Dalším takovým parametrem je vnitřní poloměr ohybu r_m , který byl pro analytický výpočet odečten pomocí CAD programu z výsledku MKP simulace. Hodnota meze kluzu $R_{p0,2}$ byla zprůměrována ze vzorků č.1 a č. 2. Tato vstupní data jsou uvedena v tab. 8.

Tab. 8 Vstupní hodnoty pro analytické výpočty.

mez kluzu	σ_k	352 MPa
materiálová konstanta	K	1460,5 MPa
exponent deformačního zpevnění	n	0,3831
vnější poloměr trubky	r	109,55 mm
střední poloměr nejširšího místa rozšíření	R_v	130 mm
střední poloměr trubky	r_s	105,46 mm
počáteční tloušťka trubky	t_0	8,18 mm
vnitřní poloměr ohybu	r_m	65 mm
koeficient tření	μ	0,12
polovina vrcholového úhlu	α	30°
úhel opásání	β	0,523 rad

Pro výpočet deformačního odporu je třeba vzít v úvahu deformační zpevnění materiálu, díky kterému se velikost napětí a deformace mění. Jedná se o extrapolovanou mez kluzu σ_{ke} (2.11) a modul zpevnění \bar{D} (2.10):

$$\sigma_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{1-0,3831}{1+0,3831} \cdot 1460,5 \cdot 0,3831^{0,3831} = 451,05 \text{ MPa}$$

$$\bar{D} = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{2}{1+0,3831} \cdot 1460,5 \cdot 0,3831^{0,3831} = 1462,3 \text{ MPa}$$

Na základě znalosti těchto hodnot a s uvážením vstupních parametrů uvedených v tab. 8 lze dle rov. (2.17) spočítat maximální radiální napětí, které bude na materiál působit:

$$\begin{aligned} (\sigma_r)_{max} &= \left[\sigma_{ke} + \frac{\bar{D}}{2} \cdot \left(\frac{R_v - r}{r} \right) \right] \cdot \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R_v} \right)^{\mu \cdot \cot \alpha} \right] \\ &= \left[451,05 + \frac{1462,3}{2} \cdot \left(\frac{130 - 109,55}{109,55} \right) \right] \cdot \left(1 + \frac{0,577}{0,12} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{109,55}{130} \right)^{0,12 \cdot 1,732} \right] \\ &= 119,32 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Další nutnou složkou, kterou je třeba spočítat, je ohybové napětí, které se skládá se ze dvou částí, kde $(\sigma_o)_I$ se vztahuje k ohybu a $(\sigma_o)_{II}$ zahrnuje napřimování během působení napětí. Celkové ohybové napětí dle (2.18):

$$(\sigma_o)_I + (\sigma_o)_{II} = \frac{\sigma_k \cdot t_o}{2 \cdot r_m + t_o} = \frac{352 \cdot 8,18}{2 \cdot 65 + 8,18} = 20,83 \text{ MPa}$$

Celkový deformační odpor materiálu (2.19):

$$(\sigma_d)_T = [(\sigma_r)_{max} + (\sigma_o)_I + (\sigma_o)_{II}] \cdot e^{\mu\beta} = (119,32 + 20,83) \cdot e^{0,12 \cdot 0,523} = 149,25 \text{ MPa}$$

Konečná přetvárná síla dle (2.21):

$$F = (\sigma_d)_T \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot t_o = 149,25 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 105,46 \cdot 8,18 \\ = 808992,1 \text{ N} \rightarrow 808,9 \text{ kN} \rightarrow 80,89 \text{ t}$$

Důležitým faktorem je také zjištění minimální tloušťky stěny t_v , která se vypočítá za pomoci tzv. koeficientu rozšiřování k_r :

$$k_r = \frac{r_s}{R_v} = \frac{105,46}{130} = 0,811$$

$$t_v = t_o \cdot \sqrt{\frac{r_s}{R_v}} = t_o \cdot \sqrt{k_r} = 8,18 \cdot 0,9 = 7,36 \text{ mm}$$

Teoreticky lze také předpovědět riziko defektů jako vznik trhliny na hraně trubky a ztrátu vzpěrné stability.

Na ověření, že defekt trhliny nevznikne lze využít základní diagram na obr. 22. a aplikovat do něj výchozí hodnoty $k_r = 0,81$, $t_o/r = 0,074$, $n = 0,38$. Výsledný diagram je znázorněný na obr. 41. Z toho lze teoreticky říci, že k defektu trhliny nedojde.

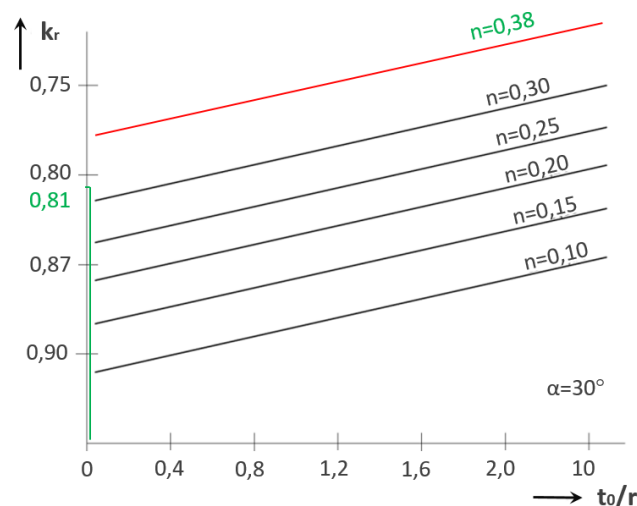
Ke ztrátě vzpěrné stability by došlo pokud:

$$(\sigma_r)_{max} > \sigma_k.$$

Po dosažení:

$$(\sigma_r)_{max} 119,3 \text{ MPa} < \sigma_k 352 \text{ MPa}.$$

Podmínka není splněna, takže ke ztrátě vzpěrné stability nedojde.

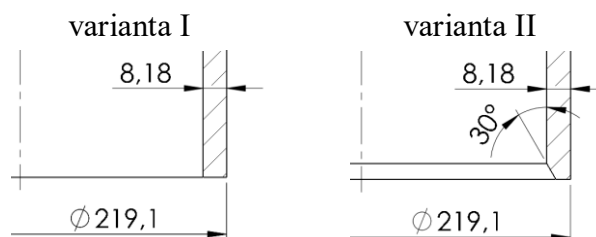


Obr. 41 Výsledný diagram kritické hodnoty k_r

3.3.2 MKP simulace [30]

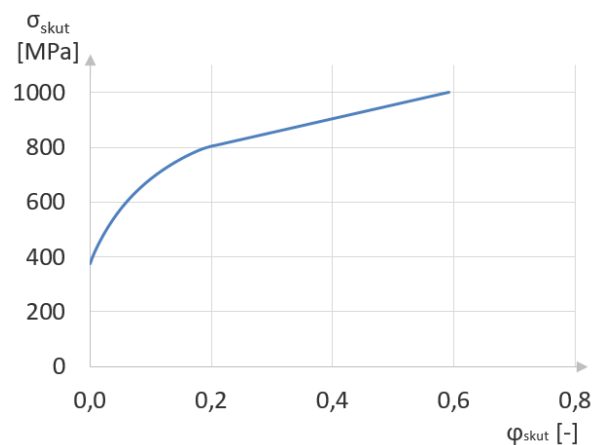
Jak již bylo zmíněno, záměrem provedení simulace bylo vytvořit teoreticky reálný proces tváření, jehož výsledek by se porovnal s analytickými výpočty a ověřil tak funkčnost tohoto způsobu výroby. Simulace byla provedena v programu ANSYS Workbench.

V tomto programu lze simulovat tvářecí proces na reálných modelech s různým konstrukčním řešením. Proto se využilo této možnosti a k porovnání byly navrženy dva odlišně obrobené konce trubek, a to s ostrou hranou (varianta I) a hranou s 30° sražením na vnitřním průměru (varianta II), viz obr. 42. Záměrem bylo zjistit vliv různého zakončení čela na výslednou tvářecí sílu.



Obr. 42 Varianty čela trubky

Pro samotné započítání simulace bylo třeba definovat mechanické vlastnosti materiálu pro tváření. Ty se určily materiálovým modelem ve formě diagramu závislosti skutečného napětí σ_{skut} na logaritmickém přetvoření φ_{skut} . Ten se zkonstruoval vyhodnocením tahové zkoušky do přetržení z kapitoly 3.1.4. Data se z plastické oblasti od $R_{p0,2}$ do R_m převedla pomocí vztahů (3.11) a (3.12). Výsledná křivka se spojila s bodem, který definuje skutečné napětí $\sigma_{skut /lom}$ při vzniku lomu způsobený danou silou F_{lom} (3.13) na skutečném přetvoření $\varphi_{skut /lom}$ (3.14). Skutečný diagram je znázorněn na obr. 43.



Obr. 43 Skutečný diagram $\sigma_{skut}=f(\varphi_{skut})$

$$\sigma_{skut} = \sigma_{smluv} \cdot (1 + \varepsilon) \quad (3.11)$$

$$\varphi_{skut} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.12)$$

$$\sigma_{skut /lom} = \frac{F_{lom}}{S} \quad (3.13)$$

kde: F_{lom} – maximální síla při vzniku lomu [N]
 $\sigma_{skut /lom}$ – skutečné napětí při vzniku lomu [MPa]
 S – konečný průřez vzorku [mm²]

$$\varphi_{skut /lom} = \ln\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (3.14)$$

kde: $\varphi_{skut /lom}$ – skutečné přetvoření při vzniku lomu [-]

Základní vstupní parametry simulace jsou uvedeny v tab. 9.

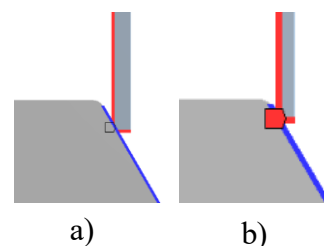
Okrajové podmínky simulace byly nastaveny tak, jak bude ve skutečnosti proces tváření probíhat. Tzn. pohyblivým elementem je trubka "A" a nepohyblivým nástroj "B", viz obr. 44. Nástroj byl nastaven jako teoreticky tuhé těleso, jehož tvar ani objem se v dané úloze nemění. Výchozí nastavení pozice obou elementů je dáno určením jejich základního kontaktu. Pro variantu I je základní kontakt na vnitřní hraně trubky a kuželovém plášti nástroje, viz obr. 45 a) a pro variantu II je na zkosené hraně a kuželovém plášti, zobrazené na obr. 45 b). Tímto bylo provedeno nastavení základních parametrů.

Tab. 9 Vstupní parametry simulace.

Typ úlohy	osově symetrická
Druh zatížení	kvazistatické
Okrajové podmínky	pohyblivý element "A" - trubka nepohyblivý element "B" - nástroj
Základní kontakt těles	varianta I: hrana trubky a plášť nástroje varianta II: zkosená hrana a plášť nástroje
Rozměry trubky [mm]	ø219,1 x 8,18, L = 700
Vrcholový úhel nástroje	60°
Hodnota zdvihu	40 mm
Třecí koeficient μ	0,12

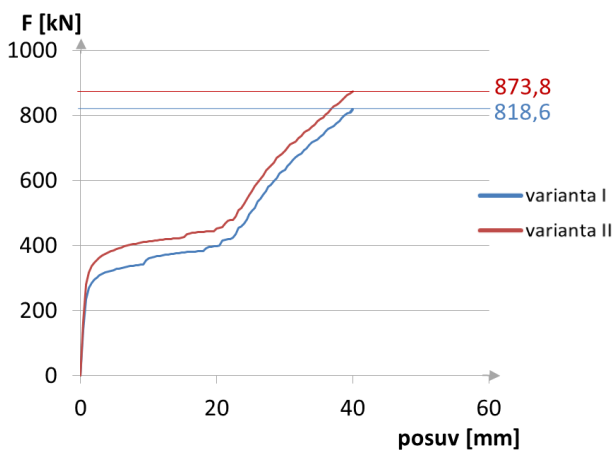


Obr. 44 Nastavení okrajových podmínek



Obr. 45 Znárodnění kontaktu elementů

Výše již bylo zmíněno, že pro simulaci byly vybrány trubky se dvěma typy konců. U obou případů bylo provedeno stejné počáteční nastavení a byl nastaven zdvih 40 mm. Tato hodnota vychází z požadované konstrukce dílce. Hlavním výsledkem byly získané závislosti tažné síly na daném zdvihu pro každý typ konce trubky. Jejich porovnání lze vidět na obr. 46. Z tohoto grafu je patrné, že menší odpor proti tváření kladla trubka s ostrou hranou (varianta I), na jejíž přetvoření bylo třeba vyvinout sílu 818,6 kN. Na přetvoření trubky se zkosenou hranou (varianta II) potom potřebná síla byla 873,8 kN. Takový výsledek jasně stanovuje, že vhodnější úprava konce trubky je s ostrou hranou, tudíž bez nutnosti jakéhokoliv obrobení. Vyšší hodnotu tvářecí síly u varianty II lze přisuzovat větší kontaktní ploše na začátku tváření a tedy i většímu třecímu odporu, který tuto sílu navyšuje.

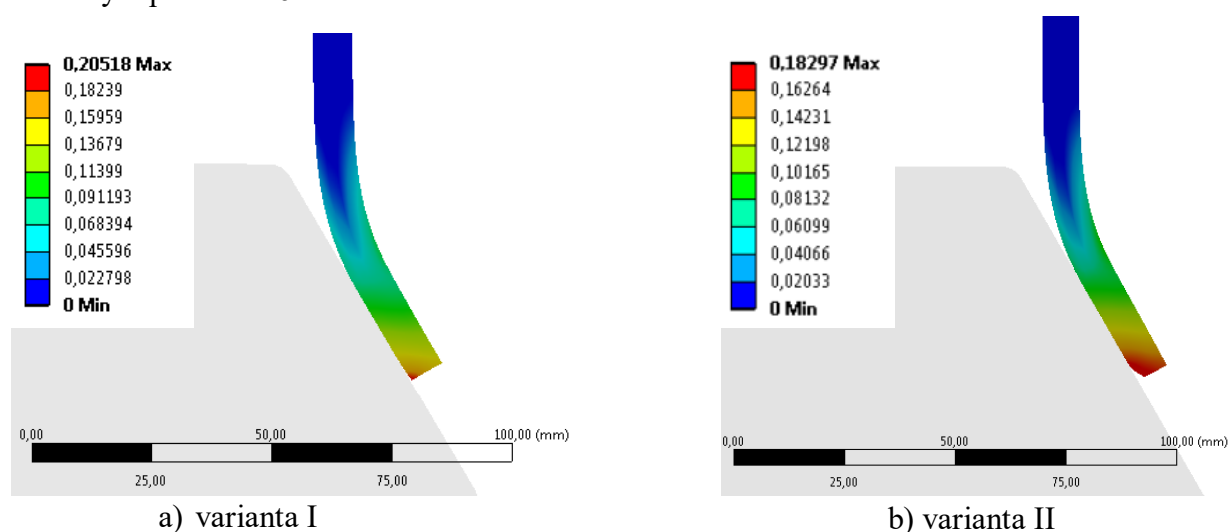


Obr. 46 Závislost tažné síly na zdvihu

Z výsledků simulace jsou dále získány vizualizace průběhů efektivního přetvoření, které jsou definovány barevným rozhraním, viz obr. 47. Toto barevné rozhraní definuje rozložení velikosti efektivního přetvoření v dané simulaci. Nejdůležitějším parametrem je červená barva společně s přidruženým rozsahem hodnot, které společně definují oblast největšího přítomného efektivního přetvoření. Tyto hodnoty je nutné porovnat s hodnotou skutečného přetvoření φ_{skut}

odpovídající mezi pevnosti materiálu. K tomu bylo možné použít graf na obr. 43, ze kterého byla odečtena hodnota skutečného přetvoření na mezi pevnosti materiálu $\varphi_{skut}=0,204$.

Ze zobrazeného průběhu lze získat předpoklad, že tvářecí proces pro variantu I (obr. 47 a)) nezpůsobí na rozšířeném průměru trhlinu. Na vnitřní hraně trubky se sice objevuje přetvoření lehce překračující mez pevnosti, nicméně toto přetvoření bylo způsobeno napěchováním hrany při počátečním nasouvání trubky na trn. Taková plastická změna nemá žádný vliv na součást z hlediska její funkčnosti. U varianty II, zobrazené na obr. 47 b), dochází na největším rozšířeném průměru v celé tloušťce k přetvoření, jehož efektivní hodnota je pod mezí pevnosti, takže i zde je riziko vzniku defektu trhliny vyloučeno. Z tohoto poznatku a zároveň porovnáním výsledných sil dle obr. 46, byla vybrána jako více vyhovující varianta I s ostrou hranou. Další vyhodnocené parametry MKP simulace jako jsou elastické přetvoření a stav po diskretizaci jsou uvedeny v příloze č. 6.



Obr. 47 Vizualizace rozložení velikosti efektivního přetvoření

3.3.3 Porovnání početních metod

Výsledky obou způsobů ověření funkčnosti metody rozšiřování byly úspěšně získány a vyhodnoceny. Hlavním cílem bylo zjistit hodnotu přetvárné síly F a predikovat vznik možných defektů.

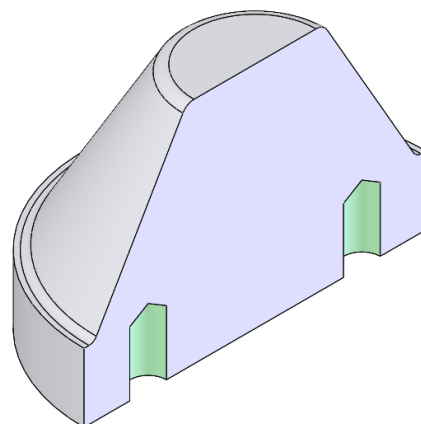
Přetvárná síla dle analytických výpočtů vykazuje hodnotu 808,9 kN a hodnota získaná z MKP simulace 818,6 kN. Zároveň byl v obou případech vyloučen vznik defektů. Porovnáním výsledných hodnot s parametry stroje, jehož nominální lisovací síla je 1000 kN, lze brát výsledek těchto početních ověření jako technicky přijatelné. Výrobu pomocí stroje OMCN 164 lze realizovat. Přehled porovnání výsledků početních metod je uveden v tab. 10.

Tab. 10 Přehled výsledků početních metod

	Analytické výpočty	MKP simulace
Výsledná přetvárná síla	808,9 kN	818,6 kN
Riziko ztráty vzpěrné stability	Ne	-
Riziko vzniku trhliny	Ne	Ne
Vhodnost stroje s nominální silou 1000 kN	Ano, rezerva 19,11 %	Ano, rezerva 18,14 %

3.4 Návrh nástroje a výrobního postupu

Konstrukce nástroje vychází z finálního požadovaného tvaru dílce. Tělo nástroje má kuželovitý tvar s vrcholovým úhlem 60 °. Na spodní straně je opatřený základnou s vyřezanými závity na uchycení do opěrné desky. Výroba nástroje se provede pomocí obráběcího centra AXA VCC 1000. Nejdříve se obrobí vnější kontura, následuje upíchnutí a opětovné upnutí tak, aby bylo možné vyřezat závity na spodní základně. Z důvodu zvýšení odolnosti vůči opotřebení a tvrdosti povrchu je povrch nástroje vytvrzen pomocí plynové nitridace. Pro výrobu nástroje byl použit vhodný materiál, který byl k dispozici na skladě společnosti, aby se minimalizovaly pořizovací náklady. Jedná se o konstrukční vysoce legovanou ocel EN 10222 - 2 X10CrMoVNb9-1 s ekvivalentem dle ČSN 17 119 (1.4903) a ASME SA - 182 F91. Vyznačuje se dobrou odolností proti korozi v prostředí vodní páry a dokáže odolat pracovním podmínkám za teplot až 650 °C. Její největší užití je zejména v energetice a chemickém průmyslu jako části kotlů, tlakové nádoby, armatury či ventily atd. Mechanické vlastnosti a chemické složení je uvedeno v tab. 11, resp. tab. 12.



Obr. 48 Schéma nástroje v řezu

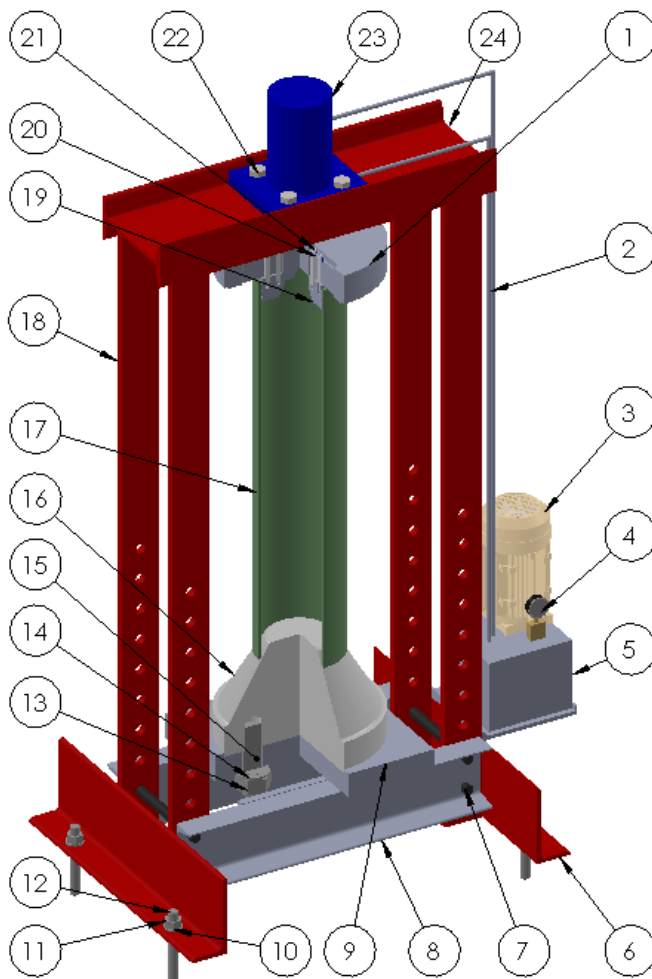
Tab. 11 Mechanické vlastnosti oceli EN 10222-2 X10CrMoVNb9-1 [5], [31].

Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	Tažnost A [%]	
		podélná	příčná
620-850	450	19	17

Tab. 12 Chemické složení oceli EN 10222-2 X10CrMoVNb9-1 [5], [31].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	V [%]	N [%]
0,05-0,15	≤ 0,5	0,3-0,6	≤ 0,025	0,417	≤ 0,040	1,9-2,6	0,87-1,13	≤ 0,040	0,18-0,25	0,030-0,070

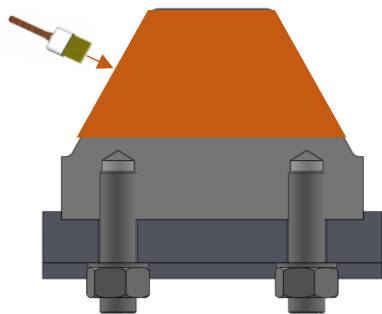
Jak již bylo zmíněno, strojem, kterým je tvářecí proces prováděn je elektro-hydraulický lis OMSN 164 (1000 kN). 3D model sestaveného stroje před započítáním tvářecího procesu je znázorněn na obr. 49 společně se seznamem dílů.



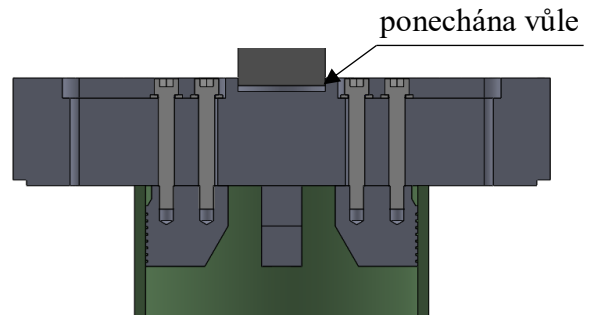
POZICE	NÁZEV DÍLU	KS
1	Příruba	1
2	Hydraulické vedení	1
3	Motor	1
4	Manometr	1
5	Ovládací skříň	1
6	Podstava	2
7	Čep $\varnothing 25 \times 300$	4
8	Podpěra	2
9	Opěrná deska	1
10	Podložka M24	4
11	Matka M24	4
12	Šroub M24x100	4
13	Matice M48	2
14	Podložka 92x50x8	2
15	Závitová tyč M48x180	2
16	Trn	1
17	Základní materiál - trubka	1
18	Rám	4
19	Kleština	4
20	Podložka 24x13x2.5	8
21	Šroub M12x90	8
22	Šroub M24x100	4
23	Hydraulický válec	1
24	Vrchní profil	1

Obr. 49 3D model stroje

Základem konstrukce je svařenec rámu, podstavy a vrchního profilu (6), (15), (21). Takto svařené díly jsou pomocí kotevních šroubů (12) pevně uchyceny k zemi. Na rám se pomocí čepů (7) připevní podpěry (8) a zajistí se. Dále jsou připevněny všechny díly hydraulického systému jako ovládací skříň, motor, hydraulické vedení, hydraulický válec atd. Do takto sestaveného lisu je vložena opěrná deska (9), na kterou se dříve pomocí šroubů uchytí trn (16). Jeho kuželový plášť se natře mazací pastou Molykote G-Rapid Plus (technická data v příloze č. 5), čímž dojde při tvářecím procesu ke snížení třecího koeficientu a tím snížení vzniku tepla mezi třecími plochami. Znárodnění ustavení trnu a polohy mazacích ploch je na obr. 50. U hydraulického válce (23) se nastaví píst do co nejvyšší polohy, tak aby pracovní prostor stroje byl co největší. Pomocí mostového jeřábu a vázacích lan, se přepraví materiál k tváření (17, bežešvá trubka) do prostoru stroje. Trubka se nasune na trn a na opačný konec se přiloží příruba (1) s kleštinami (19). Ty se příčným posunutím přitlačí k vnitřnímu průměru trubky a dotáhnou šrouby (21). Kleštiny mají funkci vodící, aby tento konec trubky byl plně fixovaný. Dále se sníží poloha pístu hydraulického válce tak, aby válcová hlava zajela do vodícího průměru příruby, ale ještě nedošlo k plošnému kontaktu s přírubou. Znárodnění montáže příruby a dojezdu hlavy je na obr. 51.

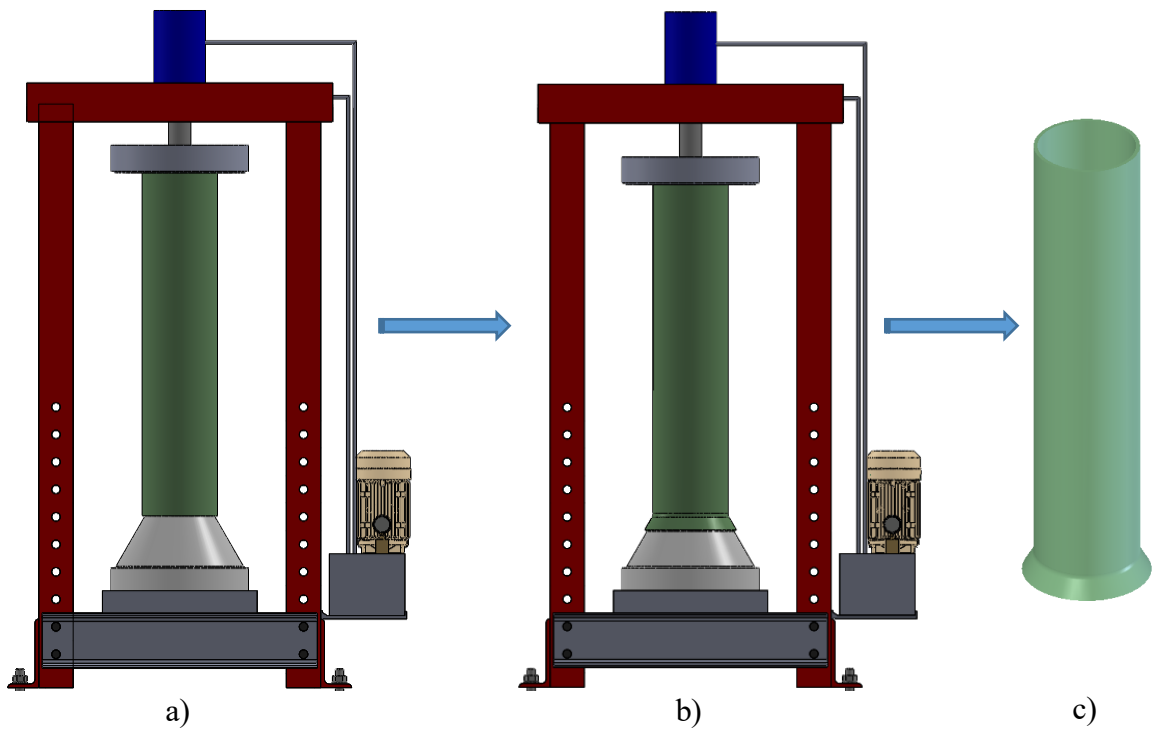


Obr. 50 Detail ustavení trnu a mazání



Obr. 51 Montáž příruby a dojezd hlavy válce

Provedením takové přípravy stroje lze vyrovnat vertikální ustavení trubky (17) do co nejpřesnější polohy. Po dokončení vyrovnávání se opět sníží poloha pístu, až dojde k plošnému kontaktu s přírubou. Na mechanickém ústrojí se snímači polohy se nastaví zdvih potřebný pro tvářenou součást. Takto připravený stroj k tvářecímu procesu je znázorněn na obr. 52 a), na obr. 52 b) je znázorněn stav po dokončení a hotová součást na obr. 52 c)



Obr. 52 Stav před a po tvářecím procesu + finální součást

4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Současná výroba dané součásti je z finančního hlediska velmi drahá a časově náročná, proto byla navržena její optimalizace za účelem snížení nákladů a výrobního času. Jako ideální řešení byla navržena technologie plošného tváření za studena. Tato technologie nahrazuje současné technologické kroky, jako jsou třískové obrábění a svařování s následným tepelným zpracováním, současně se zachováním funkčnosti a jakosti součásti. Nezanedbatelné výhody má technologie plošného tváření v odpadním hospodářství, jelikož výroba probíhá s minimálním odpadem. Pro vyhotovení konečné součásti bude použit elektro - hydraulický lis OMSN 164 s nominální lisovací silou 100 t. Jeho vhodnost byla ověřena v kapitole 3.3.3.

Jak již bylo zmíněno, z ekonomického hlediska je technologie plošného tváření značně výhodnější než současná technologie výroby. To je způsobeno zejména snížením počtu obráběcích operací, snížením nákladů na polotovary, nepřítomným svařováním a tepelné zpracování. Finanční kalkulace a porovnání současné výroby vůči optimalizaci je uvedeno v tab. 13. Jednotlivé cenové propočty vychází z interních dat poskytnutými společností. V těchto datech jsou zahrnuty hodinové sazby strojů, energie, mzdy operátorů, servis, ale také technologický postup výroby součásti a odhad strojního času. Odpisy a režie jsou citlivá data společnosti, proto byla pro tuto kalkulaci zanedbána. Nicméně nezanedbatelnou částí takové optimalizace jsou pořizovací náklady. Pro jejich kalkulaci, která je uvedena v tab. 14, byly opět použita interní data společnosti. Zde je třeba vzít v potaz, že se jedná o náklady spojené pouze s přípravnou fází výroby, nástrojem a upínacími přípravky, jelikož samotné stroje jsou majetkem společnosti, takže jejich nákup nebyl nutný.

Dle provedených kalkulací byla zjištěna úspora na 1 vyrobeném kusu 38 333 Kč, což je 53,7 % oproti současné výrobě. Pořizovací náklady činí 68 071 Kč. Tato investice má návratnost již od 3. vyrobeného kusu. S uvažováním přibližně 150 – 200 vyráběných kusů za rok, lze potom po odečtení nákladů roční úsporu očekávat v rozmezí 5,7 – 7,6 mil. Kč.

Tab. 13 Porovnání výrobních nákladů na 1 ks.

Položka	Současná výroba [Kč]	Optimalizace [Kč]
Materiál - polotovar	24 426	21 893
Obrábění	17 798	5 486
Svařování	20 223	0
Tepelné zpracování - žihání	8 937	0
Tváření	0	5 672
Celkem	71 384	33 051
Rozdíl	- 38 333 Kč [53,7%]	

Tab. 14 Porovnání pořizovacích nákladů.

Položka	Současná výroba [Kč]	Optimalizace [Kč]
Vzorky pro tah. zkoušku	0	15 328
Nástroj - trn	0	26 420
Příruba	0	14 789
Kleštiny	0	4 800
Opěrná deska	0	5 249
Šroubení	0	1 485
Celkem	0	68 071
Rozdíl	+ 68 071 Kč	

5 ZÁVĚRY

Bakalářská práce pojednává o návrhu výroby vložky do chladiče páry. Vložka primárně slouží jako ochrana těla chladiče, aby nedošlo k jeho poškození zevnitř. Tento návrh by měl optimalizovat stávající výrobní postup, který mimo jiné obsahuje technologii obrábění, svařování a tepelné zpracování.

Polotovary, z kterého se součást vyrábí je bezešvá trubka z oceli EN 10216-2 10CrMo9-10 s ekvivalentem dle ČSN 15 313 (1.7380) a ASME SA-335 P22. Finální velikost součásti lze zhotovit z polotovaru trubky $\varnothing 219,1 \times 8,18$, $L=704$. Tyto rozměry vychází z normalizovaných velikostí dle dané normy a jsou v milimetrech. Počet vyráběných součásti je přibližně 150 – 200 ks/rok.

Pro realizaci výroby součásti bylo uvažováno z několika možných variant výrobních technologií. Jako nejvhodnější byla zvolena technologie plošného tváření za studena, konkrétně rozšiřování konců trubek nepohyblivým trnem za kvazistatických podmínek. Provedením literární studie problematiky této technologie byly zjištěny všechny důležité aspekty, které je třeba vzít v potaz během ověření funkčnosti dané metody.

Pro získání hodnot parametrů meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti R_m , tažnosti A , exponentu deformačního zpevnění n a materiálové konstanty K bylo třeba provést experimentální ověření mechanických vlastností materiálu. Toto ověření se provedlo pomocí tahové zkoušky. Dle druhu těchto parametrů, byly vybrány dvě metody zkoušky, a to do přetržení a vícebodová. Po zhotovení 6 potřebných vzorků se zkoušky provedly na trhacím stroji ZD40 na pracovišti odboru technologie tváření kovů a plastů na FSI VUT v Brně. Vyhodnocením těchto zkoušek byly získány všechny parametry potřebné pro ověření funkčnosti technologie rozšiřování po teoretické stránce a to jak analyticky, tak pomocí simulace MKP. Dle těchto metod byla získána potřebná tvářecí síla a bylo možné teoreticky predikovat riziko vzniku defektů, jako jsou ztráta vzpěrné stability a vznik trhliny na rozšířeném průměru. Vyhodnocením a porovnáním obou metod bylo riziko vzniku defektů vyloučeno. Přetvárná síla dle analytických výpočtů vykazuje hodnotu 808,9 kN a hodnota získaná z MKP simulace 818,6 kN. Porovnáním těchto výsledků s parametry stroje, kterým je elektro – hydraulický lis OMCN 164 s nominální lisovací silou 1000 kN, lze brát tuto technologii rozšiřování jako technologicky funkční a přijatelnou. Dále byl navržen nástroj a výrobní postup, který se zakládá na funkci tohoto lisu.

V technicko – ekonomickém zhodnocení byly spočítány pořizovací náklady a náklady na 1 ks součásti vyrobené současným výrobním postupem a optimalizací výroby. Porovnáním těchto metod byla stanovena úspora na výrobě 1 ks 38 333 Kč, což je 53,7 %. Návratnost pořizovacích nákladů od 3. vyrobeného kusu. Roční úspora byla odhadnuta na 5,7 – 7,6 mil. Kč.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [2]

1. IMI Critical Engineering. *Product - DAM Steam Desuperheater* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.imi-critical.com/products/Pages/Product---DAM-Steam-Desuperheater.aspx>
2. *CITACE PRO* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/>
3. BODEN MATTE. *Skladový sortiment* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.boden.cz/sortiment.html>
4. ThyssenKrupp Materials International. *Material Data Sheet* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: http://www.s-k-h.com/media/de/Service/Werkstoffblaetter_englisch/Kesselrohre_EN/10CrMo910_P22_T2_2_engl.pdf
5. *ASME BPVC.II.A.: Ferrous Material Specification*. 2015. Two Park Avenue, New York, NY: The American Society of Mechanical Engineers, 2015.
6. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2., v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.
7. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2032-4.
8. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
9. BAČA, Jozef. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia skript. ISBN isbn80-227-1339-2.
10. DVOŘÁK, Milan, Karel NOVOTNÝ a František GAJDOŠ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2340-4.
11. Total Materia. In: *Hydro-forming Process of Steel: Part Two* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=344>
12. SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. *Speciální technologie tváření část I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4220-7.
13. JEANSON. Determination of High Strain-Rate Behavior of Metals: Applications to Magnetic Pulse Forming and Electrohydraulic Forming. *Key engineering materials* [online]. 2014, 611-612, 643-649 [cit. 2018-03-30]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.643. ISSN 1013-9826. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/KEM.611-612.643>

14. Technická univerzita Liberec. *Technologie II: Tváření kovů, zpracování plastů* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/11.htm
15. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN isbn978-80-7231-579-6.
16. ABDEL-MAGIED, Ragab a Mohamad ELSHEIKH. An experimental analysis of a flaring process for tube ends using a novel spinning tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, 2017(Vol.92 (1), 157-165 [cit. 2018-03-30]. DOI: 10.1007/s00170-017-0106-7. ISSN 02683768. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s00170-017-0106-7>
17. SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. *Speciální technologie tváření část II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4406-5.
18. *Handbuch der Umformtechnik*. New York: Springer, c1996. ISBN 35-406-1099-5.
19. PETERKOVÁ, Eva a Radko SAMEK. Determination of deformation resistance in tube flaring process. *MM Science Journal* [online]. 2016, 2016(5), 1332-1337 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.17973/MMSJ.2016_11_2016115. ISSN 1805-0476. Dostupné z: http://www.mmscience.eu/content/file/archives/MM_Science_2016115.pdf
20. SUCHY, Ivana. *Handbook of die design*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2006. ISBN 00-714-6271-6.
21. TSCHÄTSCHE, Heinz. *Metal forming practise: processes - machines - tools*. New York: Springer-Verlag, c2006. ISBN 35-403-3216-2.
22. STOROŽEV, Michail Vasilievič a Jevgenij Aleksandrovič POPOV. *Teória tvárnenia kovov*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1978. MDT 621.77.001.1 (075.8)
23. YUUNG-HWA LU. Study of tube flaring ratio and strain rate in the tube flaring process. *Finite Elements in Analysis and Design* [online]. 2004, 2004(Vol. 40), 305-318 [cit. 2018-04-08]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0168874X03000490>
24. Y.-M. HUANG. Finite element analysis of tube flaring process with a conical tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2004, 2004(Vol. 24), 91-97 [cit. 2018-04-08]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s00170-003-1704-0#citeas>
25. Tube forming. In: *Harco metal products, inc.* [online]. 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.tubebending.net/tubeforming.html>

26. TUBE BENDING. In: *EAGLE WIRE Innovative wire solutions*[online]. 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.eaglewire.co.nz/shop/cat/custom-made-products/tube-bending>
27. Forming components from steel tubing or partially processed punch-process parts. In: *Nikko Sangyo Co., Ltd.*[online]. 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.nikko-bulgeform.co.jp/e/product/product.html>
28. TECHNOLOGY GARAGE spol. s.r.o. In: *Hydraulické lisy* [online]. 2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.technology-garage.cz/hydraulicky-lis-omcn-164-100-t>
29. STRÁNSKÝ, Lubomír a Eva MOLÍKOVÁ. *Exponent deformačního zpevnění: cvičení DZM-K*. 2017.
30. ŘIHÁČEK, Jan. *Počítačová podpora technologie: Přednáška*. Brno: FSI VUT, 2017.
31. ThyssenKrupp Materials International. *Material Data Sheet* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.s-k-h.com/media/de/Service/Werkstoffblaetter_englisch/Kesselrohre_ASTM/P91_T91_engl.pdf
32. EXNEROVÁ, Jitka. *Vliv procesních podmínek a materiálu na mezní tvaritelnost zadaného dílce*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Prof. Ing. Radko Samek CSc.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
B	konečná šířka vzorku	[mm]
B ₀	původní šířka vzorku	[mm]
C	konečná měrná délka	[mm]
C ₀	původní tloušťka vzorku	[mm]
\bar{D}	modul zpevnění	[MPa]
D ₀	počáteční průměr trubky	[mm]
e	Eulerovo číslo	[-]
F	potřebná tvářecí síla	[N]
F _{lom}	maximální síla při vzniku lomu	[N]
K	materiálová konstanta	[MPa]
k _r	koeficient rozšiřování	[-]
L	okamžitá (konečná) měrná délka	[mm]
L ₀	počáteční měrná délka	[mm]
L _C	celková délka polotovaru	[mm]
L _N	délka rovné části trubky	[mm]
L _r	potřebná délka rozšíření	[mm]
n	exponent deformačního zpevnění	[-]
r	vnější poloměr trubky	[mm]
r _m	vnitřní poloměr ohybu	[mm]
R	největší poloměr místa rozšíření	[mm]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
r _M	vnější poloměr ohybu	[mm]
R _{p0,2}	mez kluzu	[MPa]
R _r	poloměr křivky v meridiálním směru	[mm]
r _s	střední poloměr trubky	[mm]
R _v	střední poloměr největšího místa rozšíření	[mm]
R _x	poloměr radiální křivky elementu	[mm]
R _θ	poloměr křivky v obvodovém směru	[mm]
s	dráha pojezdu příčnicku	[mm]
S	konečný průřez vzorku	[mm ²]
S ₁ , S ₂ , S ₃	plochy elementu	[mm ²]
t ₀	počáteční tloušťka stěny trubky	[mm]
t _v	minimální tloušťka stěny	[mm]
t _x	tloušťka trubky v obecném bodě	[mm]
V ₀	počáteční objem tvářené části trubky	[mm ³]
V ₁	objem ohybové části trubky	[mm ³]
V ₂	objem rozšířené části trubky	[mm ³]
V _K	konečný objem tvářené části trubky	[mm ³]
Z	kontrakce	[%]
d _α , d _v , d _θ	úhly výsečí elementu	[°]
dε _n	přírůstek deformace ve směru tloušťky	[-]
dε _r	přírůstek deformace v radiálním směru	[-]

$d\varepsilon_\theta$	přírůstek deformace v obvodovém směru	[-]
α	jednostranný úhel	[°]
β	úhel opásání	[rad]
ε_m	poměrné prodloužení na mezi pevnosti	[-]
ε_θ	deformace v obvodovém směru	[-]
μ	koeficient tření	[-]
$\bar{\sigma}$	střední hodnota PDN	[MPa]
σ_f	napětí způsobené třením	[MPa]
σ_k	mez kluzu	[MPa]
σ_{ke}	extrapolovaná mez kluzu	[MPa]
σ_n	normálové napětí	[MPa]
σ_o	ohybové napětí	[MPa]
σ_r	radiální napětí	[MPa]
$\sigma_{skut/lom}$	maximální skutečné napětí při vzniku lomu	[MPa]
σ_θ	obvodové napětí	[MPa]
$(\bar{\sigma})_{mid}$	střední hodnota přirozeného deformačního napětí	[MPa]
$(\sigma_d)_T$	celkový deformační odpor	[MPa]
$(\sigma_o)_I$	napětí v ohybu	[MPa]
$(\sigma_o)_{II}$	napětí v napřimování	[MPa]
$(\sigma_r)_{max}$	maximální hodnota radiálního napětí	[MPa]
φ_n	skutečné přetvoření ve směru tloušťky	[-]
$\varphi_{skut/lom}$	skutečné přetvoření při vzniku lomu	[-]
φ_θ	skutečné přetvoření v obvodovém směru	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

	Str.
Obr. 1 Příklady tváření trubek [25], [26], [27]	9
Obr. 2 Chladič páry, typ IMI CCI: DAM – 4010/4 [1]	10
Obr. 3 Svarek chladiče, typ IMI CCI: DAM – 4010/4	11
Obr. 4 Kónus	11
Obr. 5 Trubice	12
Obr. 6 Svarek vložky: kónus + trubice	12
Obr. 7 Postup vysokotlakého hydroformingu [11]	14
Obr. 8 Princip tvarování trubky tlakem elastomeru [12]	14
Obr. 9 Princip magneticko-impulzního tváření [14]	15
Obr. 10 Rozložení jednotlivých záběrů [16]	15
Obr. 11 Schéma metody rotujícího nástroje [16]	16
Obr. 12 Schéma s pohyblivým trnem [17]	16
Obr. 13 Přípravek na rozšiřování [17]	16
Obr. 14 Schéma s nepohyblivým trnem [17]	17
Obr. 15 Schéma s rotujícím trnem [10]	17
Obr. 16 Schéma s ruční pákou [17]	17
Obr. 17 Schéma principu rozšiřování [19]	18
Obr. 18 Schéma principu rozšiřování [17]	18
Obr. 19 Schéma geometrie obecného elementu [19]	21
Obr. 20 Schéma geometrie kuželového elementu	21
Obr. 21 Schéma ohybových napětí [19]	23
Obr. 22 Kritické hodnoty k_r [17]	25
Obr. 23 Vyznačení trhliny [17]	25
Obr. 24 Vyznačení vlny [17]	26
Obr. 25 Vyznačení zakružování [17], [24]	26
Obr. 26 Schéma finálního výrobku	27
Obr. 27 Elektro-hydraulický lis OMCN 164 [28]	27
Obr. 28 Schéma polohy vzorku	28
Obr. 29 Výkres vzorku	28
Obr. 30 Vzorky před zkouškou	28
Obr. 31 Hydraulický trhací stroj ZD40	29
Obr. 32 Upnutí vzorku do kleštin	29
Obr. 33 Náčrt měřených veličin	30
Obr. 34 Vzorky po zkoušce	30
Obr. 35 Pracovní diagram závislosti síly na dráze příčnicku	31
Obr. 36 Smluvní diagram napětí- deformace	31
Obr. 37 Závislost tažné síly na dráze příčnicku	32
Obr. 38 Aproximace křivky	32
Obr. 39 Schéma pro výpočet délky polotovaru	33
Obr. 40 Schéma rozměrů polotovaru	34
Obr. 41 Kritické hodnoty k_r	36
Obr. 42 Varianty čela trubky	37
Obr. 43 Skutečný diagram $\sigma_{skut}=f(\varphi_{skut})$	37
Obr. 44 Nastavení okrajových podmínek	38
Obr. 45 Znázornění kontaktu elementů	38
Obr. 46 Závislost tažné síly na zdvihu	38
Obr. 47 Vizualizace rozložení velikosti efektivního přetvoření	39
Obr. 48 Schéma nástroje v řezu	40
Obr. 49 3D model stroje	41

	Str.
Obr. 50 Detail ustavení trnu a mazání	42
Obr. 51 Montáž příruby a dojezd hlavy válce	42
Obr. 52 Stav před a po tvářecím procesu + finální součást	42

SEZNAM TABULEK

	Str.
Tab. 1 Mechanické vlastnosti oceli 10CrMo9-10 [4], [5].	13
Tab. 2 Chemické složení oceli 10CrMo9-10 [4], [5].	13
Tab. 3 Původní hodnoty vzorků.	30
Tab. 4 Hodnoty vzorků po zkoušce.	30
Tab. 5 Vyhodnocené veličiny pro vzorky č.1 a č.2.	32
Tab. 6 Základní mechanické vlastnosti dle materiálového listu [4].	33
Tab. 7 Vstupní hodnoty pro výpočet délky polotovaru.	33
Tab. 8 Vstupní hodnoty pro analytické výpočty.	35
Tab. 9 Vstupní parametry simulace	38
Tab. 10 Přehled výsledků početních metod	39
Tab. 11 Mechanické vlastnosti oceli EN 10222-2 X10CrMoVNB9-1 [5], [31].	40
Tab. 12 Chemické složení oceli EN 10222-2 X10CrMoVNB9-1 [5], [31].	40
Tab. 13 Porovnání výrobních nákladů na 1 ks.	43
Tab. 14 Porovnání pořizovacích nákladů.	43

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1 Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/
- Příloha č. 2 Materiálový list EN 10216-2 10CrMo9-10 [4]
- Příloha č. 3 Materiálový list EN 10222-2 X10CrMoVNb9-1 [31]
- Příloha č. 4 Elektro – hydraulický lis OMCN 164, technické parametry[28]
- Příloha č. 5 Molykote® G-Rapid Plus – technické informace [4]
- Příloha č. 6 Vyhodnocené parametry MKP simulace

Příloha č. 1 Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

1/1

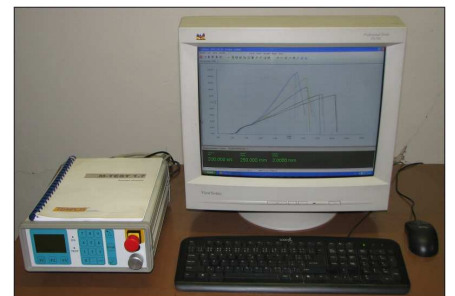
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropské výrobci univerzálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

ThyssenKrupp Materials International



Alloy steel tubes for high-temperature service

Material Data Sheet

Steel designation:	Name	Material No.
	P22/T22 (10CrMo9-10)	UNS Designation: K21590 (1.7380)

Scope

This data sheet applies for seamless tubes.

Application

The material P22/T22 is especially suited for steam boiler, boiler parts, boiler drum, pressure vessel for the apparatus engineering and similar purposes. It can be used in permanent operation with wall temperatures up to about 590 °C (1094 °F).

Chemical composition (Heat analysis in %)

Name	C	Si	Mn	P	S	Al _{ges.}	Cu	Cr	Mo
P22/T22	0,05-0,15	≤ 0,50	0,30-0,60	≤ 0,025	≤ 0,025	-	-	1,9-2,6	0,87-1,13
10CrMo9-10	0,08-0,14	≤ 0,50	0,30-0,70	≤ 0,025	≤ 0,020	≤ 0,040	≤ 0,30	2,00-2,50	0,90-1,10

Mechanical properties at room temperature

Material	Usual ¹⁾ Delivery condition	Product thickness mm	Yield/ proof strength R _{eH} /R _{p0,2} N/mm ² min.	Tensile strength R _m N/mm ²	Elongation A % min.		Impact energy KV J min.		
					Temperature °C	Temperature °C			
P22/T22 ⁵⁾	+NT	-	205	415	30 ²⁾⁴⁾	20 ³⁾⁴⁾	-	-	
10CrMo9-10	+NT	≤16	280	480-630	22 ²⁾	20 ³⁾	+20	40 ²⁾	27 ³⁾
		16≤40	280						
		40≤60	270						

- ¹⁾ NT: normalized and tempered; QT: quenched and tempered
- ²⁾ Longitudinal test piece
- ³⁾ Transverse test piece
- ⁴⁾ For wall thicknesses ≤ 8 mm apply the values: longitudinal 22 % and transverse 14 %
- ⁵⁾ Hardness max. 85 HRB

Minimum values of the proof strength R_{p0,2} at elevated temperatures

Name	0,2 %-Proof strength at the temperature °F in Ksi									
	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
P22 ASME B31.3 ^{a)}	18,0	17,9	17,9	17,9	17,9	17,8	12,8	7,8	3,2	1,6

Name	0,2 %-Proof strength at the temperature °F in Ksi										
	-20 to 100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
P22/T22 ASME B31.1 ^{b)}	17,1	17,1	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	13,6	8,0	3,8

^{a)} ASME 31.3 - Process Piping ^{b)} ASME 31.1 - Power Piping
 Conversion Ksi in N/mm² (MPa): Value in Ksi x 6,895 Conversion Fahrenheit in Celsius: C = (Temp. in F - 32) x 5/9

ThyssenKrupp Materials International



Remark

The material is magnetizable.

Editor

THYSSENKRUPP MATERIALS INTERNATIONAL GMBH
Technical Sales / Quality Management
Am Thyssenhaus 1
45128 Essen

References

ASME/ASTM A106:2010
ASTM A213:2011-02
ASTM A335:2009-03

ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700,
West Conshohocken, PA 19428-2959

ASME 31.3:2010
ASME 31.1:2010

The American Society of Mechanical Engineers, Three Park Avenue,
New York, NY 10016-5990

DIN EN 10216-2:2007-10

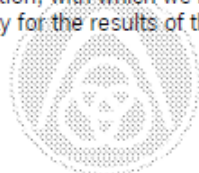
Beuth Verlag GmbH, Post box, D-10772 Berlin

Böhler Schweißtechnik Deutschland GmbH, Hamm

Important Hint

Information given in this data sheet about property or applicability of materials respective products are no assurance of characteristics but serve for description.

Information, with which we like to advise you, relate to the experience of the producers and our own. Warranty for the results of the treatment and application of the products cannot be granted.



ThyssenKrupp

ThyssenKrupp Materials International



Alloy steel tubes for high-temperature service

Material Data Sheet

Steel designation:	Name	Material No.
	P91	UNS Designation: K91560
	T91	K90901
	(X10CrMoVNb9-1)	(1.4903)

Scope

This data sheet applies for seamless tubes.

Application

The material P91/T91 is especially suited for steam boiler, boiler parts, boiler drum, pressure vessel for the apparatus engineering and similar purposes. It can be used in permanent operation with wall temperatures up to about 650 °C (1202 °F).

Chemical composition (Heat analysis in %)

Name	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo	Ni	V	N	others
P91	0,08-0,12	0,20-0,50	0,30-0,60	≤0,020	≤0,010	≤0,040	8,0-9,50	0,85-1,05	≤0,40	0,18-0,25	0,030-0,070	Nb 0,06-0,10
T91	0,07-0,14	0,20-0,50	0,30-0,60	≤0,020	≤0,010	≤0,02	8,0-9,5	0,85-1,05	≤0,40	0,18-0,25	0,030-0,070	Nb 0,06-0,10
X10CrMoV Nb9-1	0,08-0,12	0,20-0,50	0,30-0,60	≤0,020	≤0,010	≤0,040	8,0-9,5	0,85-1,05	≤0,40	0,18-0,25	0,030-0,070	Nb 0,06-0,10 Cu ≤0,30

Mechanical properties at room temperature

Material	Usual ¹⁾ Delivery condition	Yield/ proof strength R _{p0,2} N/mm ² min.	Tensile strength R _m N/mm ²	Elongation A		Impact energy KV	
				% min.	(13) ⁴⁾	Temperature °C	J min.
P91 ⁵⁾	+NT	415	≤ 585	20 ²⁾	(13) ⁴⁾	-	-
T91 ⁵⁾	+NT	415	≤ 585	20 ²⁾	(13) ⁴⁾	-	-
X10CrMoVNb9-1	+NT	450	620-850	19 ²⁾	17 ²⁾	+20	40 ²⁾ 27 ²⁾

¹⁾ NT: normalizing and tempered

²⁾ Longitudinal test piece

³⁾ Transverse test piece

⁴⁾ For wall thicknesses ≤ 8 mm the values of the transverse testpiece apply

⁵⁾ Hardness max. 25 HRC

Minimum values of the proof strength R_{p0,2} at elevated temperatures

Name	0,2 %-Proof strength at the temperature °F in Ksi									
	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
P91 ASME B31.3*	28,3	28,2	28,1	27,7	26,7	24,9	22,3	18,0	10,3	4,3

Name	0,2 %-Proof strength at the temperature °F in Ksi											
	-20 bis 100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
P91/T91 ASME B31.1 ^a	24,3	24,3	24,3	24,2	24,1	23,7	22,9	21,3	19,1	16,3	9,6	4,3

^a ASME 31.3 - Process Piping

^b ASME 31.1 - Power Piping

Conversion Ksi in N/mm² (MPa): Value in Ksi x 6,895

Conversion Fahrenheit in Celsius: C = (Temp. in F - 32) x 5/9

Name	0,2 %- Proof strength at the temperature r °C in N/mm ² (MPa)											
	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	
X10CrMoVNb9-1	410	395	380	370	360	350	340	320	300	270	215	

Reference data for some physical properties

Density at 20 °C kg/dm ³	Modulus of elasticity kN/mm ² at				Thermal conductivity at 20 °C W/m K	spec. thermal capacity at 20 °C J/kg K	spec. electrical resistivity at 20 °C Ω mm ² /m
	20 °C	300 °C	400 °C	500 °C			
7,76	210	185	175	165	33	622	0,24

Linear coefficient 10⁻⁶ K⁻¹ of thermal expansion between 20 °C and

300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
12,9	13,5	13,9	14,1

Hot forming / Heat treatment

Hot forming		Heat treatment (quenched and tempered), microstructure		
Temperature °C	Type of cooling	Austenitization	Annealing ¹⁾	Microstructure
1100 - 950	Air	920 - 980 °C	680 - 760 °C	bainitic/ferritic

¹⁾ When annealing the mentioned temperatures have to be hold after achieving over the whole cross-section for minimum 30 minutes.
Stress relieving anneal: 600 - 650°C. Holding time 1-2 minutes per mm plate thickness, minimum 30 minutes

Processing / Welding

Standard welding processes for these steel grades are:

TIG-welding	Arc welding (E)
MAG-welding massive wire	Submerged arc welding (SAW)
MAG- welding cored wire	

Depending on the welding position and the plate thickness, maybe other filler metals have to be applied, which can be inquired at the manufacturer in case of need.

For these steel grades as filler metal the following electrodes and welding wires are recommended:

Process	Filler metal
TIG	Union I CrMo 910
MAG massive wire	Union I CrMo 910
MAG cored wire	Union MV CrMo - M21
Arc welding (E)	Phoenix SH Chromium 2KS

ThyssenKrupp Materials International

SAW	Union S1CrMo2 / UV 420 TTR
-----	----------------------------

These steels can be welded within all thickness ranges according to the afore mentioned welding processes. Preheating up to 200 °C is permitted for work pieces with thicknesses > 10 mm.

After welding for work pieces, which are subject to the technical regulations for steam boiler plants, a heat treatment has to be defined in particular. In all cases stress relieving anneal has to be performed.

When flame cutting of larger wall thicknesses is performed the cutting area has to be preheated up to 200 °C.

Remark

The material is magnetizable.

Editor

THYSSENKRUPP MATERIALS INTERNATIONAL GMBH
 Technical Sales / Quality Management
 Am Thyssenhaus 1
 45128 Essen

References

ASME/ASTM A106:2010
 ASTM A213:2011-02
 ASTM A335:2009-03

ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700,
 West Conshohocken, PA 19428-2959

ASME 31.3:2010
 ASME 31.1:2010

The American Society of Mechanical Engineers, Three Park Avenue,
 New York, NY 10016-5990

DIN EN 10216-2:2007-10

Beuth Verlag GmbH, Postfach, D-10772 Berlin

Böhler Schweißtechnik Deutschland GmbH, Hamm

Important Hint

Information given in this data sheet about property or applicability of materials respective products are no assurance of characteristics but serve for description.

Information, with which we like to advise you, relate to the experience of the producers and our own.

Warranty for the results of the treatment and application of the products cannot be granted.



PRESSE ELETTROIDRAULICHE A UNA VELOCITA' LENTA COMPLETE DI MANOMETRO

Presse idrauliche a motore con centralina ad alta pressione e manometro, dotate di valvola di taratura e di distributore di comando a tre posizioni (avanzamento folle ritorno). Tutte le macchine sono complete di olio. I vari modelli sono inoltre corredati di argano per il sollevamento del piano di lavoro (escluso Art.154/ML e 156/ML).

Gli steli sono in acciaio speciale, trattato e cromato.

Le macchine vengono fornite senza alcun punzone.

Omologazione CE completa di compatibilità elettromagnetica.

PRESSES ELECTROHYDRAULIQUES A UNE VITESSE LENTE, AVEC MANOMETRE

Presse hydrauliques à moteur avec groupe hydraulique à haute pression et manomètre, équipées d'une soupape d'étalonnage et d'un distributeur de commande à trois positions (avancement-point mort-retour). Livrées avec l'huile, tous les modèles sont munis d'un treuil pour relever le tablier (sauf art.154/ML et 156/ML). Vérins en acier spécial, traité et chromé.

Poinçons non fournis.

Approvation CE avec compatibilité électromagnétique.

ELECTROHYDRAULIC ONE SLOW SPEED PRESSES, WITH MANOMETER

Motor-driven hydraulic presses with high pressure gearbox and manometer, fitted with a calibration valve and a three-position drive-distributor (feed neutral return).

All the machines are complete with oil. These models are also equipped with winch for the hoisting of the working-table (Art.154/ML and 156/ML excepted).

Shafts are in treated and chromium-plated special steel.

The machines are delivered with no punch tools.

CE approved with electromagnetic compatibility.

LAHGSAME EINSTUFIGE ELEKTROHYDRAULISCHE PRESSEN, MIT MANOMETER

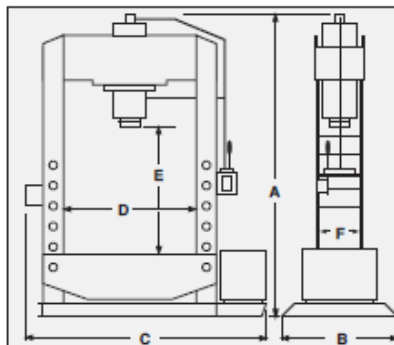
Elektrohydraulische Pressen, Hochdruckaggregat und Manometer. Ausgestattet mit Regulier- und 3-Wege-Ventil (Vorschub Leerlauf Rücklauf). Aufnahmetisch (durch Seitwinde verstellbar- Ausnahme: 154/ML und 156/ML). Alle Maschinen komplett mit Ölfüllung.

Kolben aus vergütetem und verchromtem Spezialstahl.

Die Maschinen werden ohne Stanzwerkzeug geliefert.

CE-Zulassung komplett mit elektromagnetischer Kompatibilität.

- Art. 154/ML - 10 Ton.
- Art. 156/ML - 20 Ton.
- Art. P30/ML - 30 Ton.
- Art. 161 - 40 Ton.
- Art. 162 - 50 Ton.
- Art. 163 - 70 Ton.
- Art. 164 - 100 Ton.



Art. 164

Art.	Capacità Capacity Capacité Belastbarkeit Ton.	Corsa pistone Piston stroke Course du vérin Kolbenhub mm.	Potenza motore Motor power Puisseance moteur Motorleistung KW	Portata centralina Gearbox capacity Capacité du groupe hydraulique Aggregatleistung lt/min	Velocità stelo Rod speed Vitesse du piston Hub Geschwindigkeit mm/min	A	B	C	D	E	F	Peso Weight Poids Gewicht Kg.
154/ML	10	260	1,5	1,6	570	1900	500	1100	520	980	120	174
156/ML	20	285	1,5	1,6	420	1920	500	1110	510	1020	140	190
P30/ML	30	260	1,5	2,4	300	2000	600	1600	695	1000	170	320
161	40	260	1,5	2,4	300	2070	850	1575	770	1135	200	440
162	50	260	1,5	2,4	210	2080	850	1570	770	1135	210	480
163	70	310	3	4,5	260	2205	900	1755	880	1120	270	740
164	100	310	3	4,5	180	2260	900	1930	1010	1055	285	1000



Product Information Specialty Lubricants

MOLYKOTE® G-Rapid Plus Solid lubricant paste

FEATURES

- Low friction coefficient
- High pressure-absorption capacity
- Prevents seizure and scoring
- Suppresses stick-slip
- Reduces formation of fretting corrosion
- Facilitates disassembly
- Good coverage
- Provides emergency running performance

COMPOSITION

- Mineral oil
- Solid lubricants

Solid lubricating paste with particularly low friction coefficient for assembly and running-in of metallic components

APPLICATIONS

- Suitable for the press-fit production of all types of machine elements, as a running-in lubricant for new machines and gears, as permanent lubrication of machine elements which are submitted to slight or intermittent movement only, as well as for drilling, sawing and thread-cutting.
- Used to lubricate threaded spindles, splined shafts, tooth gearing, worm gearing, moving screws, fittings, pumps, guides on machine tools, as well as for fitting ball and roller bearings, pulleys, wheel flanges and bolts.

TYPICAL PROPERTIES

Specification writers: These values are not intended for use in preparing specifications. Please contact your local Dow Corning sales representative prior to writing specifications on this product.

Standard*	Test	Unit	Result
	Color		Black
	Consistency, density		
	Unworked penetration	mm/10	255-275
	Density at 20°C (68°F)	g/ml	1.40
	Temperature		
	Service temperature range	°C	-35 to +450
		°F	-31 to +842
	Load-carrying capacity		
DIN 51 350 pt.4	Four-ball tester		
	Weld load	N	5300
	Almen Wieland machine OK load	N	>20000
	Coefficient of friction		
	In bolted connection M12, 8.8 with blackened surface (Erichsen tester),		
	- μ thread		0.10
	- μ head		0.06
	Press-Fit test, μ		0.05, no chatter
	Resistance		
DIN 51 807 pt.1	Water resistance, static, evaluation		1-90

* DIN: Deutsche Industrie Norm

HOW TO USE

How to apply

Clean the sliding surfaces or contact areas, then apply paste with a brush, cloth, synthetic sponge or window leather. Do not use in excess as with

grease lubrication. Vigorous rubbing into metal surface will improve adhesion. Do not mix with greases or oils.

Product Information Specialty Lubricants

MOLYKOTE® G-Rapid Plus Solid lubricant paste

FEATURES

- Low friction coefficient
- High pressure-absorption capacity
- Prevents seizure and scoring
- Suppresses stick-slip
- Reduces formation of fretting corrosion
- Facilitates disassembly
- Good coverage
- Provides emergency running performance

COMPOSITION

- Mineral oil
- Solid lubricants

Solid lubricating paste with particularly low friction coefficient for assembly and running-in of metallic components

APPLICATIONS

- Suitable for the press-fit production of all types of machine elements, as a running-in lubricant for new machines and gears, as permanent lubrication of machine elements which are submitted to slight or intermittent movement only, as well as for drilling, sawing and thread-cutting.
- Used to lubricate threaded spindles, splined shafts, tooth gearing, worm gearing, moving screws, fittings, pumps, guides on machine tools, as well as for fitting ball and roller bearings, pulleys, wheel flanges and bolts.

TYPICAL PROPERTIES

Specification writers: These values are not intended for use in preparing specifications. Please contact your local Dow Corning sales representative prior to writing specifications on this product.

Standard*	Test	Unit	Result
	Color		Black
	Consistency, density		
	Unworked penetration	mm/10	255-275
	Density at 20°C (68°F)	g/ml	1.40
	Temperature		
	Service temperature range	°C	-35 to +450
		°F	-31 to +842
	Load-carrying capacity		
DIN 51 350 pt.4	Four-ball tester		
	Weld load	N	5300
	Almen Wieland machine OK load	N	>20000
	Coefficient of friction		
	In bolted connection M12, 8.8 with blackened surface (Erichsen tester),		
	- μ thread		0.10
	- μ head		0.06
	Press-Fit test, μ		0.05, no chatter
	Resistance		
DIN 51 807 pt.1	Water resistance, static, evaluation		1-90

* DIN: Deutsche Industrie Norm

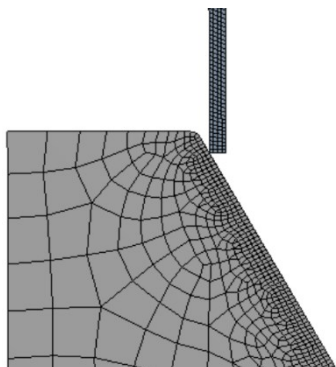
HOW TO USE

How to apply

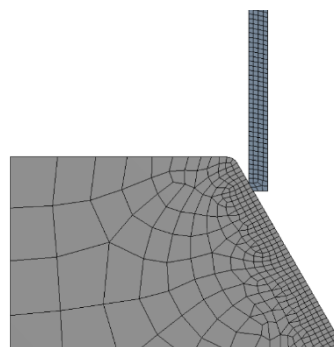
Clean the sliding surfaces or contact areas, then apply paste with a brush, cloth, synthetic sponge or window leather. Do not use in excess as with

grease lubrication. Vigorous rubbing into metal surface will improve adhesion. Do not mix with greases or oils.

Geometrie po diskretizaci:

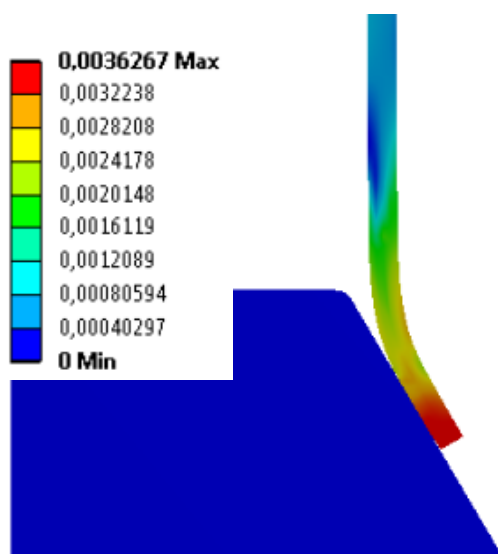


konec trubky s ostrou hranou

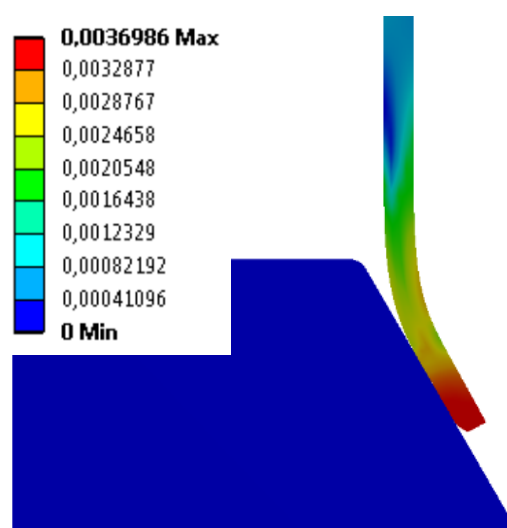


konec trubky se zkosenou hranou

Elastické přetvoření:



konec trubky s ostrou hranou



konec trubky se zkosenou hranou