



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 DUSÍTKA TROMBONU

DESIGN FOR THE PRODUCTION OF A TROMBONE SILENCER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaroslav Munduch

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jaroslav Munduch**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Podaný, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh výroby dusítka trombonu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh výroby dusítka na trombon. Součástka je prostorového tvaru a pravděpodobně bude vyráběna technologiemi plošného tváření, nejspíše tažením bez ztenčení stěny nebo kovatlačením. Na zvolenou problematiku bude také zaměřena literární studie a následně i vlastní řešení.

Cíle bakalářské práce:

- zhodnotit a popsat zadanou součást – dusítko,
- provést rozbor možných technologií výroby se zhodnocením jejich vhodnosti a nevhodnosti,
- vypracovat aktuální literární studii se zaměřením na zvolenou technologii,
- zhodnotit technologičnost výroby dusítka,
- zpracovat návrh výroby doložený nezbytnými technologickými a kontrolními výpočty,
- navrhnout a popsat tvářecí nástroj,
- zhotovit základní výkresovou dokumentaci vybraných částí.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan; GAJDOŠ, František a NOVOTNÝ, Karel. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3425-7.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1992. ISBN 80-214-0401-9.

SAMEK, Radko; ŠMEHLÍKOVÁ, Eva a LIDMILA, Zdeněk. Speciální technologie tváření. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-214-4406-52.

TIŠNOVSKÝ, Miroslav a MÁDLE, Luděk. Hluboké tažení plechu na lisech. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00221-4.

TSCHATTSCH, Heinz. Metal forming practise: processes - machines - tools. New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-3-540-33216-9.

MARCINIAK, Zdislaw; DUNCAN, John L. a HU, Jack S. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2. vyd. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 07-506-5300-00.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem bylo navrhnout výrobu dusítka trombonu. Je to komplikovaná rotační součást s konstantní tloušťkou stěny 0,5 mm. Nejvhodnější technologií pro zhotovení 500 kusů z hliníkové slitiny EN AW – 3103 bylo zvoleno kovotlačení. Pro něj byla zhodnocena technologičnost, navrženy rozměry polotovaru, tvary a materiál nástrojů pro dvě operace, a nakonec výrobní postup.

Klíčová slova

dusítka trombonu, kovotlačení, forma, nástroje pro kovotlačení, konstantní tloušťka stěny

ABSTRACT

The goal was to design the production of a trombone mute. It is a complex rotational part with a constant wall thickness of 0.5 mm. Metal spinning was chosen as the most suitable technology for manufacturing 500 pieces from the aluminum alloy EN AW – 3103. The manufacturability was evaluated, the dimensions of the blank, the shapes and material of the tools for two operations were designed, and finally, the production process was developed.

Keywords

trombone mute, metal spinning, mandrel, metal spinning tools, constant wall thickness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MUNDUCH, Jaroslav. *Návrh výroby dusítka trombonu*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157712>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Návrh výroby dusítka trombonu vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno 24.5.2024

místo, datum

Jaroslav Munduch

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Kamilu Podanému Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce a za čas strávený konzultacemi. Dále pak své rodině a přátelům za trpělivost a podporu při celém studiu.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

| | |
|--------------------------------------|----|
| ÚVOD | 9 |
| 1 ROZBOR ZADÁNÍ..... | 10 |
| 1.1 Návrh výrobní technologie | 12 |
| 2 KOVOTLAČENÍ | 15 |
| 2.1 Vybavení | 18 |
| 2.1.1 Forma..... | 19 |
| 2.1.2 Nástroje..... | 21 |
| 2.2 Stroje | 22 |
| 2.3 Technologičnost | 24 |
| 3 NÁVRH VÝROBY | 25 |
| 3.1 Polotovar | 27 |
| 3.1.1 Průměr polotovaru | 28 |
| 3.2 Zhodnocení technologičnosti..... | 31 |
| 3.3 Výrobní nástroje | 34 |
| 3.4 Síly..... | 36 |
| 3.5 Upnutí polotovaru..... | 38 |
| 3.6 Postup | 38 |
| ZÁVĚR..... | 40 |

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam výkresů

ÚVOD

Výroba součástek je velmi důležitým prvkem snad ve všech průmyslových odvětvích. V moderní době se stala složitým procesem, kde jsou zapojeny různé strojírenské technologie. Snahou je vytvářet co nejefektivnější procesy výroby, volit co nejkvalitnějších a nejvhodnějších materiály pro dané prostředí, tvořit produkty co nejkvalitněji, nejpřesněji, a to vše s vynaložením co nejmenších nákladů a úsilí. Všechny nároky zpravidla nelze splnit, proto musí konstruktéři s technologií najít co nejvhodnější kompromis mezi všemi těmito požadavky.

Strojírenská technologie provází součást od jejího návrhu, přes samotnou výrobu až po kontrolu správnosti produkce a funkce výsledného dílce. Především se zabývá procesy výroby součástí. Dělí se do čtyř základních skupin, a to svařování, odlévání, obrábění a tváření.

Tváření využívá způsob zhotovení součástí, kdy je materiál pomocí sil deformován do požadovaného tvaru a vlivem plastických vlastností kovů setrvává ve změněném stavu. Dělí se podle teploty během procesu na tváření za tepla a za studena a také podle směrů deformací na objemové a plošné. Do plošného se řadí například hluboké tažení, ohýbání, zakružování nebo kovotlačení.

Kovotlačení, zobrazené na obr. 1, je výrobní technologie využívaná převážně pro kusovou a levnou výrobu rotačních součástí (obr. 3). Nachází uplatnění při výrobě uměleckých předmětů, při renovacích starých automobilů, při výrobě antén (obr. 2), v letectví apod.



Obr. 1 Ruční kovotlačení [1].



Obr. 2 Výroba parabolické antény [12].



Obr. 3 Výtlačky [3].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Řešeným dílcem je dusítka (obr. 4), které se vkládá do korpusu trombonu, tj. do zvonovité rozevřené konce nástroje, viz obr. 5. Jedná se o hudební pomůcku, která během hraní svým tvarem a umístěním mění proudění vzduchu, čímž modifikuje jeho zvukové vlastnosti. V korpusu je nejčastěji uchyceno pomocí korkových elementů nebo je přidržováno pouze rukou.



Obr. 4 Model dusítka.



Obr. 5 Trombon [4].

Tvar, velikost, uchycení a materiál dusítka mají zásadní vliv na rezonanci, intonaci, možnosti využití a výsledný zvukový charakter. Existuje jich nepřehledné množství různých druhů. Mezi nejznámější patří:

- Straight mute – je nejčastěji využívané dusítka. Většina proudů vzduchu jej obtéká díky vymezovacím segmentům, kterými je drženo na svém místě. Část ale směřuje dovnitř, tím je dusítka (obr. 6) rozevřena a vzniká charakteristický zvuk. Na stejném principu funguje i tzv. cup mute (obr. 7), bucket mute a mnoho dalších.



Obr. 6 Straight mute [5].



Obr. 7 Cup mute [5].

- Wah wah mute – zcela ucpává korpus nástroje korkovou vložkou (obr. 8). Vzduch prochází skrze úzkou trubici uprostřed, nebo je zachycen skořepinou okolo. Zakrýváním a odkrýváním kalíšku na konci úzké trubice může hráč upravovat výsledný zvuk. Nejikoničtější skladbou s využitím wah wah mute je Žabák od hudebního skladatele Pavla Trojana, kde trombon imituje žabu.
- Plunger mute – je nejjednodušší typ. Rozdílem od ostatních je, že na rozdíl od výše zmíněných dusítek nemá žádné korkové vymezovací elementy, jen dosedací plochu z PVC, viz obr. 9. Je využíváno nejčastěji v jazzové hudbě, kdy hráč libovolně zakrývá nebo odkrývá korpus trombonu, a tím vytváří specifický zvuk.



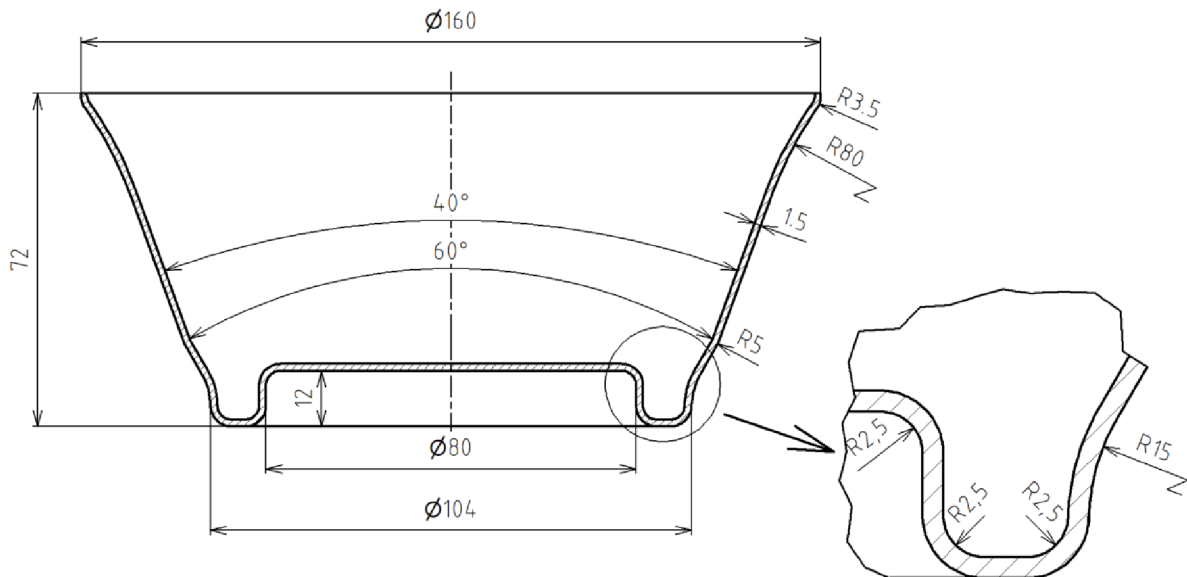
Obr. 8 Wah wah mute [5].



Obr. 9 Plunger mute [5].

Zvoleným dusítkem k návrhu výroby je plunger mute. Je to dutá rotační nádoba s prolisovaným dnem a rozevírajícím se pláštěm. Tvar modelu, viz obr. 4, je navržen podle dusítka na obr. 9 a jeho geometrie je na obr. 10. Velký průměr 160 mm a konstantní tloušťka stěny 0,5 mm byli určeny podle již existující varianty. Výška je navržena na 72 mm. Průměr dna byl stanoven na 104 mm, jehož součástí je prolis s hloubkou 12 mm o průměru 80 mm. Jeho plochy na sebe navazují přes radiusy 2,5 a 3 mm. Plášť je kombinací pěti rotačních ploch. První je kolmá ke dnu a přes rádius R15 navazuje na druhou se sklonem 60°. Dále navazuje přes rádius R5 na třetí s úhlem 40°, následující čtvrtá je zaoblená poloměrem 80 mm a nakonec je malá válcová plocha spojená přes R3,5. Na obvodu dusítka je kvůli ochraně laku trombonu přidán chránič z PVC, který ovšem v této práci nebude uvažován.

Z funkčního hlediska nemusí být dusítko v korpusu na přesně daném místě, a tak nejsou na přesnost výroby kladeny vysoké nároky. Proto byla zvolena obecná tolerance ČSN ISO 2768 – cL, to je pro velký průměr $\pm 1,2$ mm a pro výšku $\pm 0,8$ mm. Jediným požadavkem na funkčnost je zajištění kruhovitosti velkého průměru.



Obr. 10 Geometrie dusítka.

Volba materiálu je velmi důležitým rozhodnutím. Odvíjí se od něj všechny další proměnné, od samotné technologie výroby až po výsledné vlastnosti součástí. Mezi zásadní parametry požadované pro ideální funkčnost a spolehlivost dílce se řadí:

- Pevnost – schopnost materiálu odolávat vnějším silám bez porušení. S vyšší pevností roste životnost výrobku a s tím ruku v ruce i kvalita. Vzhledem k povaze užívání však u dusítka nedochází k velkému namáhání materiálu, a tak je dostačující i relativně nízká pevnost.
- Zdravotní nezávadnost – je požadavkem na chemické složení materiálu. Neměl by obsahovat žádné škodlivé či toxické látky nebo pouze v malém, zdraví neohrožujícím množství.
- Korozivzdornost – schopnost neztrácet své vlastnosti vlivem prostředí, tzn. materiál výrobku nepodléhá chemickým reakcím prostředí. Dusítko musí při svém používání odolávat zvýšené vlhkosti z důvodu kondenzace par z dechu.
- Hmotnost – je ovlivněna hustotou použité slitiny. Dusítko je během hudební produkce drženo v ruce, a tak je pro co největší komfort hráče žádoucí, aby mělo co nejnižší váhu.

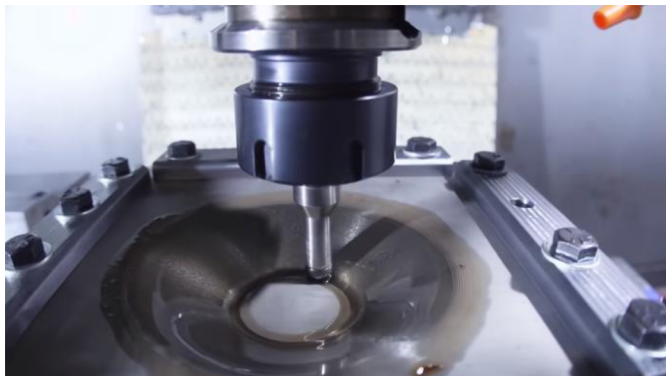
S ohledem na výše zmíněné požadavky se jako vhodné materiály jeví elastomer, plast nebo kov. Kvůli své malé pevnosti a vysoké pružnosti elastomery a plasty pohlcují mnohem více zvuku než kov, který naopak rezonuje a obohacuje tón o další frekvence a přidává na barevnosti zvuku. Proto je pro výrobu navrhovaného dusítka nejvhodnějším materiálem materiál kovový. V praxi se nejčastěji užívají slitiny hliníku nebo mědi.

Vzhledem k využití pouze profesionálními hráči (téměř výhradně v jazzu) se jedná o malosériovou výrobu. Neexistují žádné statistiky a průzkumy o využití tohoto typu, proto byl počet kusů v jedné výrobní sérii stanoven na 500.

1.1 Návrh výrobní technologie

Zadaná součást může být vyrobena nepřeberným množstvím technologií, ale každá má své výhody a nevýhody. Důležitými parametry jsou podíl odpadu, rychlost, vhodnost pro zhotovení z hliníkové nebo měděné slitiny, přesnost a ekonomičnost produkce. Zásadní je také konstantní tloušťka stěny součástí, která byla stanovena na 0,5 mm. Uvažovanými technologiemi tedy jsou:

- Jednobodové inkrementální tváření – je druhem plošného tváření, kdy na upnutý plech tlačí tvářecí nástroj pouze v jednom bodě a postupným objížděním kontury součásti tváří polotovár. Výhodami je jednoduchost, levnost a univerzálnost nástroje, díky kterým se využívá v prototypové výrobě. Předností je i možnost výroby prolisovaného dna pomocí protinástroje v jedné operaci. S jednobodovým inkrementálním tvářením se pojí dlouhé strojní časy, navíc je nutné ostřížení výrobku. Zásadním nedostatkem je neschopnost vytvořit konstantní tloušťku stěny.



Obr. 11 Jednobodové inkrementální tváření [6].

- Kombinace zakružování, svařování a lisování – je postup výroby, kdy se zakruží pás plechu, konce se svaří k sobě a následně se přivaří i dno s prolisem. Poté se vzniklé těleso rozšíří do požadovaného tvaru. Pozitivem je levnost a jednoduchost jednotlivých procesů. Lze vyrobit kvalitní dusítka s požadovanými rozměry – především s prolisovaným dnem. Nevýhodou je vzniklá svarová housenka, kterou je nutné po dokončení součásti odstranit. Svařování zadaných materiálů, tedy hliníkových nebo měděných slitin, navíc s tloušťkou plechu 0,5 mm, vyžaduje speciální metody, které výrazně prodražují výrobu. Další nevýhodou je vysoký počet různých technologií a operací a nutnost kvalifikovaných zaměstnanců. Postup je tak vhodný spíše pro výrobu prototypů a není ideální pro zhotovení 500 kusů.



Obr. 12 Svařování [7].

- Tažení konvenčním nástrojem – využívá plastických vlastností materiálu a pomocí stroje tváří polotovary do požadovaného tvaru. Zadaná součást je axisymetrická a dutá s neměnicí se tloušťkou stěny vhodná k tažení. Má minimální podíl odpadu a velmi krátké strojní časy, což jsou ideální parametry pro levnou výrobu. Navíc se dá jednoduše automatizovat a výroba se obvykle pohybuje ve třídě přesnosti IT14, která bezpečně splňuje normu ČSN ISO 2768 – cL [8]. Prodrazuje ji ovšem složitost zadané součásti. Kvůli tvaru pláště a prolisovanému dnu by byly třeba operace navíc. S přibývajícemi operacemi se však zmenšuje plasticita materiálu a hrozí nutnost zařazení žíhání kvůli obnově plastických vlastností tzn. další výdaje. Ve prospěch technologie nehraje ani potřeba specializovaných nástrojů, která ji vzhledem k pořizovacím nákladům činí ekonomicky nevýhodnou. [9]



Obr. 13 Hluboké tažení [10].

- Hydroform – je metodou plošného tváření, při které je tažnice nahrazena tlakovou kapalinou působící proti tažníku. Výhodou je možnost tažení složitých tvarů bez nutnosti výroby tažnice a výborná distribuce tvářecích sil na materiál. Polotovár je možné táhnout déle, tzn. utržení dna hrozí mnohem později než u konvenčních metod. Lze tvářet tenké plechy na malý počet operací – ideální pro plech 0,5 mm. Splňuje požadavek na konstantní tloušťku stěny, přesnou výrobu i minimální podíl odpadu, vzniklého při ostřihování. Nevýhodami jsou delší strojní časy jednotlivých operací, nutnost čištění výrobku od tlakové kapaliny a vysoké pořizovací náklady na stroj (pokud ho již daný podnik nevlastní). [11]



Obr. 14 Hydromechanické tažení [12].

- Kovotlačení – je způsob tváření kovů, kdy výrobek vzniká natlačením polotovaru na rotující formu neboli tvárnici. Protože je materiál tvářen postupně, tzn. pouze v jednom bodě v daný okamžik, tvárnost materiálu se vyčerpává pomaleji než u konvenčních metod. I na pohled složité součásti jde zhotovit na jednu operaci. Je splněn požadavek zadání na konstantní tloušťku stěny 0,5 mm a přesnost výroby podle ČSN ISO 2768 – cL. Je to levná, jednoduchá technologie s minimálním podílem odpadu vhodná pro výrobu 500 kusů. Na druhou stranu má delší strojní časy a je zde nutná proškolená obsluha. [13; 1].

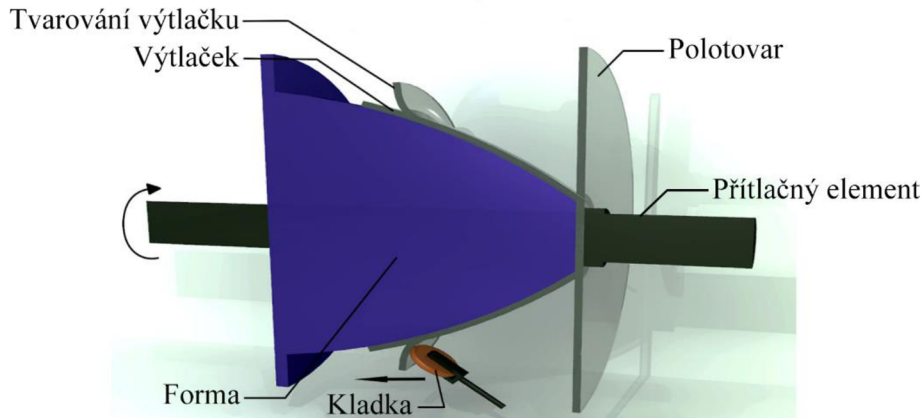


Obr. 15 Kovotlačení [14].

Nejvhodnější technologií, která splňuje požadavek na konstantní tloušťku stěny 0,5 mm, levnou, přesnou, rychlou a jednoduchou výrobu pro 500 kusů a minimální podíl odpadu, se zdá být kovotlačení. Na něj bude provedena teoretická a návrhová část práce.

2 KOVOTLAČENÍ

Kovotlačení je způsob výroby tenkostěnných, axisymetrických součástí. Na vřeteníku specializovaného stroje, nebo jen obyčejného soustruhu, je pomocí lící desky či příruby upnuta forma, přičemž její tvar je dutinou vyráběné součásti. Tvářený polotovar je uchycen na její čelo pomocí pinoly koníku přes přítlačný element a díky vřetenu je celá sestava roztáčena, jak je schematicky zobrazeno na obr. 16. Samotné tváření výtlačku se provádí kovotlačitelským nástrojem (kladkou) a probíhá pouze v místě, kde působí na plech. [15; 13]



Obr. 16 Schéma kovotlačení [16].

Kovotlačení umožňuje jednoduchou výrobu vypuklých a vydutých tvarů, které by šly jinak vyrábět velmi těžko např. parabolické, kuželové i sférické plochy. Polotovary jsou nejčastěji kruhové přístřihy plechu, mohou však mít i jiné tvary, např. čtvercové, mohou jimi být i předlisované nebo svařené součásti. [15; 13]

Ve strojírenských podnicích se využívají dva různé způsoby kovotlačení. Rozdělují se podle ovládání nástroje na:

- Ruční – tvářecí sílu, působící na polotovar, vyvíjí přímo pracovník pomocí nástroje na dlouhé tyči. Tyč s nástrojem se zapře o kolík v opěrné liště a tím vzniká páka, díky které je výsledná síla dělníka několikrát větší (obr. 17). Síla je odhadnuta zaměstnancem a musí se pohybovat v rozmezí, kdy je dostatečně velká, aby tvářela polotovar, ale zároveň nesmí způsobovat štěpení a praskání kovu. Kvůli omezené lidské síle nepřesahují obvykle zhotovované součásti v průměru několik stovek milimetrů a např. pro dural tloušťku polotovaru 2 mm. Ruční ovládání se vyznačuje značnou přesností, ale vyžaduje zkušenou obsluhu. Má dlouhé výrobní časy, které při větších sériích prodražují výrobu – je ideální pro kusovou výrobu, ve které je nenahraditelné. [15; 13]



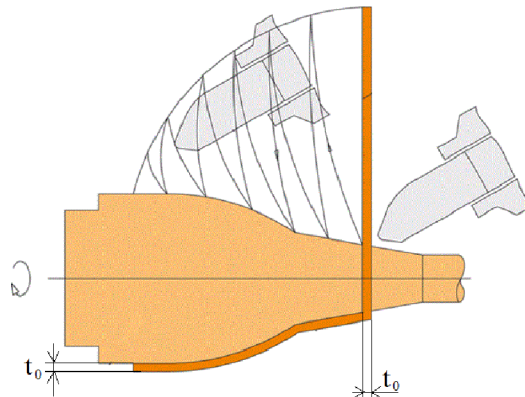
Obr. 17 Ruční kovotlačení [17].

- Strojní – tlačný nástroj je ovládán pomocí stroje, jak je vidět na obr. 18. Může být ovládán NC či CNC řízením, nebo kopírovacím zařízením. Všechny podstatné aspekty, které mají vliv na výrobu dílce jsou přímo během procesu upravovány, aby byl zajištěn co nejlepší výsledek dané operace. Mezi řízené faktory se řadí mimo jiné otáčky a přítlačná síla nástroje. Sériová výroba na specializovaných automatizovaných strojích, s k tomu uzpůsobenými nástroji, umožňuje provádět několik operací současně, např. přehlazování polotovaru, ostříhování, zužování a spojování dílců. Je to efektivní a rychlé ovládání nástroje, které převažuje v sériové výrobě díky své vysoké produktivitě, a tedy nižším celkovým nákladům. [15; 13]



Obr. 18 Strojní kovotlačení [18].

Podle teorie nedochází při kovotlačení ke ztenčení stěny polotovaru. Výtlaček má stejnou tloušťku pláště, dna i netvářeného polotovaru, jak je vidět na obr. 19. Ve skutečnosti k němu dochází, ale je tak malé, že se dá zanedbat, protože se projevuje zvětšením plochy výtlačku obvykle o 5 – 7 % oproti polotovaru. [13]



Obr. 19 Kovotlačení bez ztenčení stěny [15].

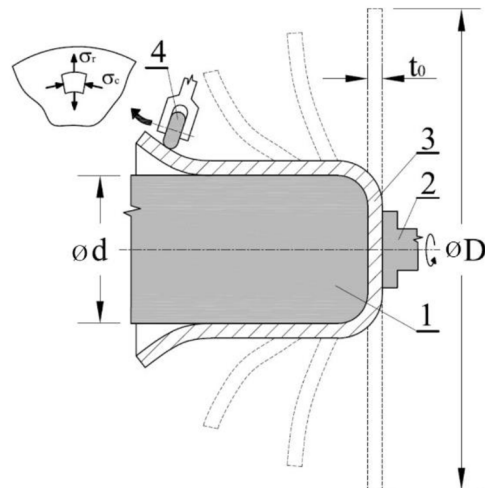
Pro výtlačky beze změny tloušťky stěny se vypočítává stupeň přetvoření, jehož maximální hodnota je dána vlastnostmi materiálu. Pokud by byl během tváření překročen, je třeba operaci rozdělit na dvě a zařadit mezioperační žihání. Počítá se dle vztahu [13; 19]:

$$K_{\max} > K \quad (2.1)$$

kde: K_{\max} – maximální stupeň přetvoření daný materiálem,
 K – stupeň přetvoření;

$$K = \frac{D}{d}, \quad (2.2)$$

kde: D – průměr polotovaru (obr. 20),
 d – průměr formy (obr. 20).



Obr. 20 Zobrazení průměru polotovaru a výtlačku [20].

Maximální hodnota stupně deformace při rotačním tlačení je omezena vznikem trhlin [13]:

- na okraji příruby od ohybového napětí nebo vln v přírubě v důsledku tangenciálního napětí, viz obr. 21a),
- v přechodu mezi přírubou a válcovou částí výtlačku působením napětí od axiální posuvné síly tlačného nástroje, viz obr. 21b).



a) zvlnění okrajů



b) trhlina v přechodu ploch

Obr. 21 Vady výtlačků [19].

Vznik vad je ovlivněn mnoha faktory. Na jedné straně mechanickými a plastickými vlastnosti materiálu a jeho strukturou, na straně druhé technologickými parametry procesu jako je tvar tvárnice, geometrie nástroje, jeho trajektorie, počet přejetí nástrojem a jeho posuv. Zásadní vliv na pozitivní výsledek procesu má i tloušťka polotovaru. Se zvětšující se tloušťkou klesá riziko zvlnění, ale stoupá nebezpečí vzniku trhlin a ztenčování. [13; 19]

Kovotlačení je schopné vytvářet výtlačky o vysoké přesnosti. Se zvětšujícími se rozměry součásti ovšem postupně klesá. Přesnost výrobků vzhledem k rozměrům a tvaru tvárnice se vypočítává jako [13]:

$$T = (0,001 \text{ až } 0,002) \cdot d, \quad (2.3)$$

kde: d – průměr tvárnice.

Drsnost výtlačku a jeho přesnost výrazně ovlivňuje posuv nástroje. Jeho velikost v rozmezí $0,125 \text{ až } 0,25 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ zajišťuje velmi dobré vlastnosti povrchu, viz obr. 22. S vyšším posuvem, který se pohybuje v rozmezí $0,6 \text{ až } 0,75 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ se dosahuje vyšší drsnosti (obr. 23), ale lepšího přiléhání polotovaru na formu a vyšší přesnosti. [13]



Obr. 22 Hladký povrch [20].



Obr. 23 Drsný povrch [21].

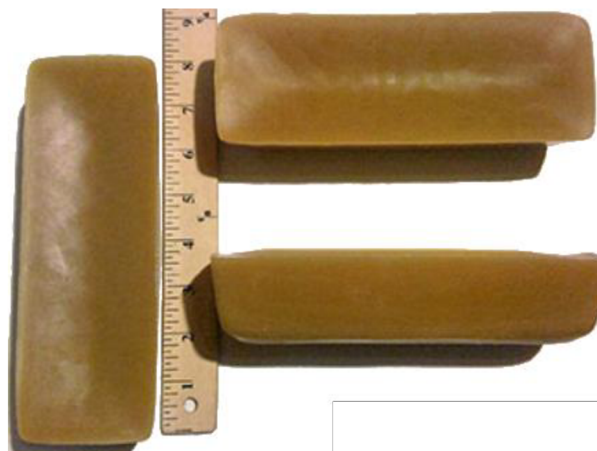
2.1 Vybavení

Při kovotlačení je využíváno několika různých druhů pracovního náčiní. Každé má svůj účel a specifické využití. Musí umožňovat přesné a rychlé zhotovení výtlačku, jednoduchost při použití i během manipulace. Při jejich výrobě či nákupu je nutné zohlednit vhodné mechanické vlastnosti materiálu v kombinaci s přiměřenými náklady na pořízení. S cenou souvisí i výdaje vynaložené na jejich uskladnění. Svými vlastnostmi zásadně ovlivňují kvalitu výsledného produktu.

Mezi inventář, bez kterého by se výroba neobešla, patří i mazivo. Zajišťuje lepší přesnost geometrie výtlačku, jeho podstatně lepší povrch a prodlužuje životnost nástroje. Aby plnilo svůj účel co nejlépe, jsou na něj kladeny požadavky [15; 13]:

- snadná roztíratelnost,
- vytvoření rovnoměrné vrstvy po celé ploše polotovaru,
- dostatečná přilnavost – aby neodkapávalo,
- zdravotní nezávadnost – aby nezapáchalo nebo jinak neobtěžovalo pracovníky.

Při strojní výrobě mazivo plní dvě funkce. První je snižování tření mezi nástrojem a tvářeným výrobkem a druhým účelem je chlazení z důvodu vyšších otáček a posuvů než u ručního kovotlačení, kde se ve výjimečných případech ani nemusí použít. Při vysoké míře zahřívání během tváření je nastříkáváno na nástroj a výrobek. Jako maziva se používají lůj, vosk (obr. 24), gel, jádrové mýdlo, rostlinný olej či speciální grafitové pasty. Na konci výroby se zpravidla odstraňuje. [15; 13]



Obr. 24 Vosk [22].

2.1.1 Forma

Jedním z nejdůležitějších vybavení pro výrobu kovotlačením je forma. Je to matrice ve tvaru dutiny požadovaného výrobku, na kterou je natlačen polotovar. Uchycuje se nejčastěji do sklíčidla soustruhu, kterým je roztáčena a současně s sebou unáší i tvářený materiál. Otáčky formy se mohou počítat z maximálních doporučených obvodových rychlostí pro dané materiály, ale nejčastěji se zjišťují experimentálně. [13]

Tab. 1 Maximální obvodové rychlosti kovotlačení [23].

| Hliník, mosaz [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] | Měď, stříbro [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] | Ocel [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] |
|--|---|---|
| 1500 | 1200 | 750 |

Formy musí být precizně vyrobené kvůli přesnosti výroby, musí mít vysokou pevnost a tuhost, aby byly schopny odolávat tvářecím silám a samozřejmě musí být co nejlevnější z důvodu zvýšení rentability produkce. Dělí se podle:

- Materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, na:
 - Dřevěné – používají se pro výrobu do 10 součástí. Je to nejlevnější materiál, který se nejjednodušeji obrábí, má ovšem malou schopnost udržet si svůj původní tvar a malou tvrdost a tuhost, ač se pro zhotovení používají tvrdá dřeva, zpravidla dub nebo javor. Nejčastěji se vyrábí slepením prken, viz obr. 25, následně je dřevo obrobena do požadovaného tvaru, nalakováno a po vyschnutí je forma připravena k použití. [15]



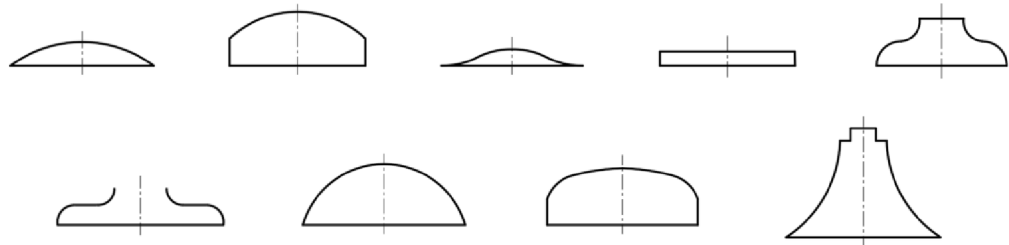
Obr. 25 Slepená dřevěná tvárnice [24].

- Litinové – používají se pro výrobu 10 – 100 součástí. Nejčastěji používaným materiálem je šedá litina. Vhodná je kvůli svým dobrým mechanickým vlastnostem, jako je pevnost a tuhost, ale především kvůli své nízké ceně. [15]
- Ocelové – využívá se běžná ocel. Pro výrobní série nepřesahující 250 kusů, se odlévá a nad tuto hranici se vyrábí z hutních polotovarů. Úprava povrchu se provádí podle složitosti tvaru na konvenčních nebo CNC řízených soustruzích. Jedná se o nejdražší ze zmíněných materiálů ovšem s nejlepšími mechanickými vlastnostmi. Kvůli zajištění trvanlivosti formy, je vyžadováno kalení povrchu, aby nedocházelo k odírání. Příklad je uveden na obr. 26, což je forma pro tažení titanového polotovaru. [15]



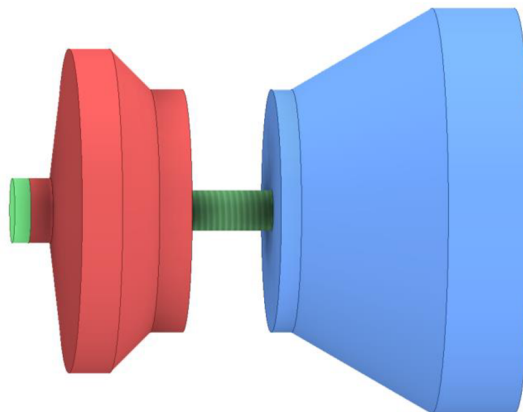
Obr. 26 Kovová forma [25].

- Složitosti tvaru a počtu dílů, ze kterých je poskládána na:
 - Jednoduché – jsou to formy z jednoho kusu materiálu, ze kterých jde jednoduše sejmout výtlaček. Jedná se o plochy kuželové, sférické, parabolické, válcové atd. Některé příklady jsou uvedeny na obr. 27. Jejich výroba je snadná a levná. [15; 26]



Obr. 27 Příklady jednoduchých tvarů pro kovotlačení [27].

- Dělené – jsou to formy složené ze dvou a více kusů spojené nejčastěji čepy se závitem. Používají se u výtlačků, ze kterých by nešla vyjmout forma na konci kovotlačení, protože u nich dochází ke zmenšování a poté rozšiřování průměru, jak je vidět na obr. 28. [15; 26]



Obr. 28 Dělená forma [28].

2.1.2 Nástroje

Pro vytvoření výrobku je nutné vyvinout síly, které jsou schopny deformovat polotovar. K jejich přenosu se používají nástroje. Velmi důležitá je jejich geometrie, která určuje vhodnost pro konkrétní operace. Rozdělují se do dvou skupin podle stavby na:

- Paličky – jsou kovové tyčovitě náčiní se speciálními hlavičkami, viz obr. 29a). Nejběžnějším materiálem pro jejich výrobu je ocel, ovšem pro počáteční fáze tváření se využívají i dřevěné. Pro tváření korozivzdorných ocelí nebo hliníkových slitin se využívá i bronz. Výroba paliček je jednoduchá, levná a lze je vyrobit v téměř každém strojírenském podniku. Každá má svým tvarem daný specifický účel od klasického tlačení přes hlazení až po upichování přídatku. [15]

Využívají se jako ruční nástroje, vsazené do dřevěných násad, viz obr.29b), kvůli lepší ergonomii a možnosti využití síly celého těla dělníka, ale hlavně proto, aby se mohly opřít o kolík v základní desce a přes vzniklou páku vyvinuly vyšší síly na výtlaček. [15]



a) detail hlaviček paliček



b) celé paličky

Obr. 29 Paličky [29].

- Kladky – jsou na ložisku uložené válcové, či jinak tvarované kotouče. Jsou rotačně volně uloženy. Díky tomu přenášené tvářecí síly na výtlaček způsobují pouze malé opotřebení nástroje i povrchu výrobku. Jsou tvořeny nejčastěji nástrojovou ocelí, kalenou a popouštěnou na tvrdost 60 až 65 HRC. Ovšem z hlediska ceny a životnosti nástroje si ocel moc dobře nestojí. Jako alternativy se běžně používají kovové i nekovové materiály např. duraspin, gesadur, acetal, nebo jemnozrné slitiny M2 a M4. [15]

Využívají se téměř výhradně pro strojní kovotlačení, viz obr. 30, ale výjimečně se objevují v ručním rotačním tváření. Takový typ je stejně jako paličky uložen ve dřevěné násadě, jak je vidět na obr. 31.

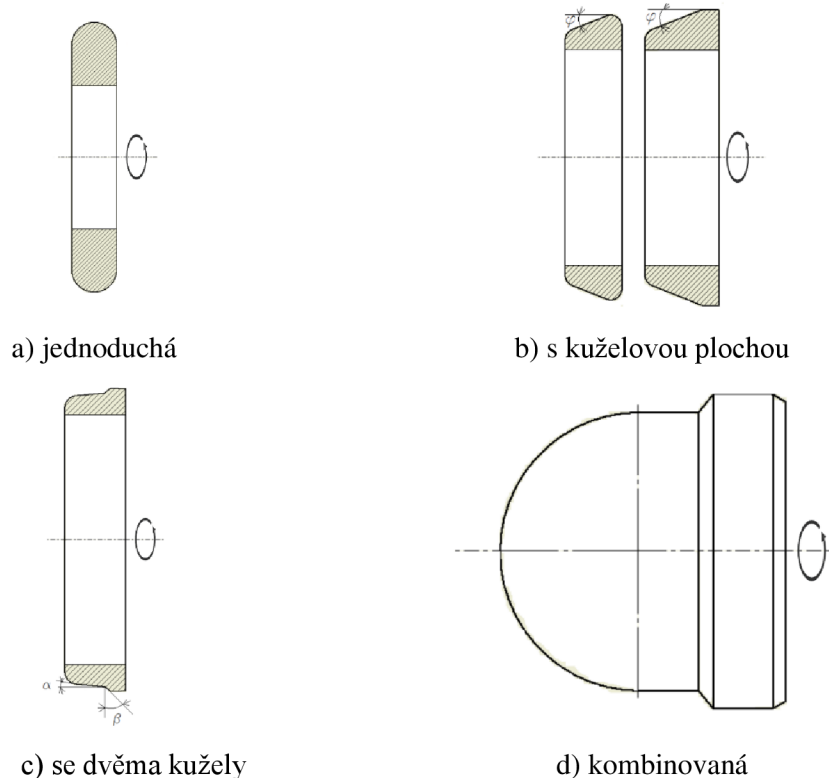


Obr. 30 Kovotlačitelství soustruh [30].



Obr. 31 Kladky pro ruční výrobu [31].

Geometrie kladek se odvíjí od jejich využití, ale všechny se potýkají se stejnými problémy. Je kladen důraz na nízkou výrobní cenu, aby před sebou netlačily materiál – nedocházelo ke zvlnění a polotovary se neodlepovaly od tvárnice. Jednoduchá kladka na obr. 32a) je především levná na výrobu, ovšem dochází u ní k již výše zmíněným problémům. Kladka s kuželovou plochou na obr. 32b) je z pohledu ceny stále levná a vhodněji řeší problém vzniku vln. Kladka se dvěma kuželovými plochami na obr. 32c) a kombinovaná kladka na obr. 32d) jsou z pohledu vzniku vln nejpříznivější, ale jsou nejdražší na výrobu. [15]



Obr. 32 Tvary kladek [15].

2.2 Stroje

Používání kovotlačení významně vzrostlo po zavedení strojní výroby. S vyšším využitím v praxi rostou nároky na schopnosti stroje, a tedy jejich modernizaci. Posun zaznamenal celkový výrobní čas, který se zkrátil především v oblasti upínání polotovaru na stroj a samotné výrobě. Jsou kladeny vyšší nároky na přesnost, rychlost a v neposlední řadě na celkovou rentabilitu. [15]

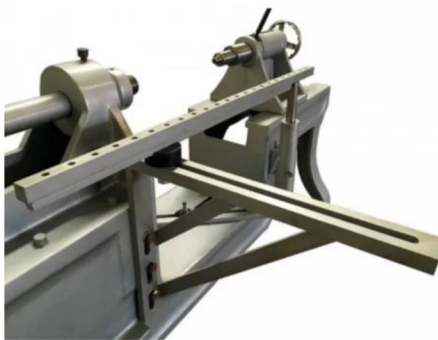
Kovotlačení lze provádět na strojích, které jsou schopny roztočit formu s polotovarem a dokáží zajistit dostatečnou tuhost soustavy. Využití strojů se dělí na základě množství vyráběných součástí na:

- Kusovou výrobu – používají se stroje s ručním ovládním nebo konvenční soustruhy s případnými úpravami, jako je odmontování lože kvůli velikosti rondule. Jako příklad pro ruční rotační tváření je zde uveden kovotlačitelský soustruh D31 (obr. 33) od firmy Stan group, který se řadí mezi malé stroje. I přes to může zpracovat polotovar o maximálním průměru 800 mm. Neznamena to však, že ručním kovotlačením lze zhotovit jen malé předměty. To dokazují ve firmě Kitajima Shibori Seisakusho, kde čtyři dělníci společně vyráběli parabolické antény. [2]



Obr. 33 Kovotlačitelský ruční soustruh D31 [32].

Součástí strojů s ručním vedením nástroje je opěrná lišta. Je to libovolně dlouhá deska s dírami v jedné nebo dvou řadách. Do nich se zasouvá kolík, o který se později opírá tvářecí nástroj, viz obr. 34 a 35. Kolík je v desce s postupujícím procesem posouván, aby byla pro dělníka výroba co nejsnadnější a dosáhl co nejlepšího výsledku. Obě již zmíněné součásti se kvůli úspoře nákladů vyrábí z levných konstrukčních ocelí, ale kvůli delší životnosti je vhodné je kalit. [15; 13]



Obr. 34 Jednořadá deska [32].



Obr. 35 Dvouřadá deska [33].

- Sériovou výrobu – pro vysoký počet požadovaných součástí se vyplatí zvážit pořízení specializovaného kovotlačitelského stroje. Oproti ručnímu kovotlačení zajišťuje stále totožné podmínky výrobního procesu a tím i neměnné výsledné rozměry všech výtlačků. Mohou na polotovar působit většími silami, tudíž zvládnou produkovat větší výrobky s vyšší tloušťkou stěny a potřebují k tomu méně operací, v optimálním případě pouze jednu. Jako příklady jsou uvedeny CNC stroje od firmy DeYi:
 - DY350 (obr. 36) – je to jeden z menších strojů o rozměrech s maximálním průměrem polotovaru 350 mm a malou spotřebou elektrické energie. Disponuje pěti ovládanými osami s přesností řízení na 0,02 mm. Je schopen tvářet hliníkový plech do 3 mm a měděný do 2 mm s maximální přitlačnou silou 4 kN. [34]



Obr. 36 DY350 [34].

- DY980 (obr. 37) – patří mezi větší stroje s rozměry 3000x1900x1900 mm s maximálním průměrem polotovaru 1000 mm a odběrem 13,7 kW. Kvůli dostupnosti všech míst výtlačku disponuje pěti řízenými osami s přesností 0,02 mm. Je schopen tvářet hliníkový plech do 5 mm a měděný do 4 mm. [34]



Obr. 37 DY980 [34].

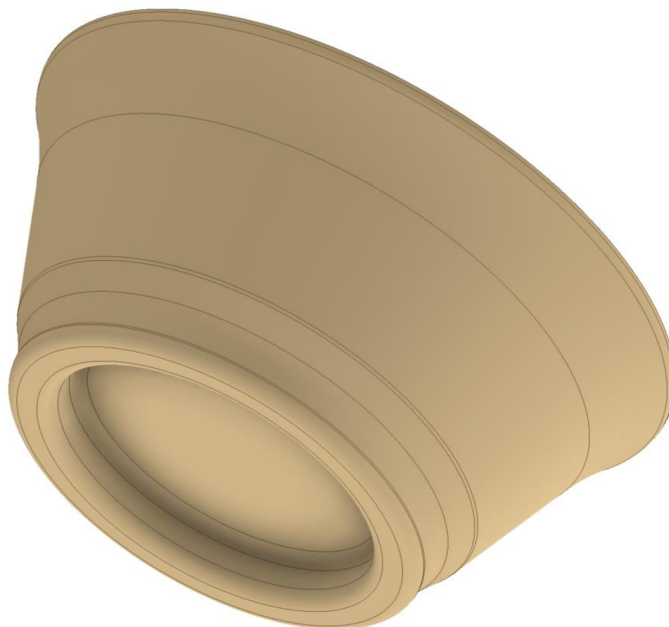
2.3 Technologičnost

Schopnost výrobních procesů, postupů a technologií efektivně využívat dostupné technologické prostředky k dosažení stanovených cílů se souhrnně označují jako technologičnost. Zahrnuje optimalizaci výrobních operací s ohledem na dosažení co nejvyšší výrobnosti, minimalizaci nákladů, zlepšení kvality výrobků a celkové efektivity procesů. Obecně se mohou hlavní požadavky na konstrukci z hlediska technologičnosti uvést do následujících zásad [13]:

- Materiál – musí disponovat vhodnými mechanickými vlastnostmi pro výrobu danou technologií. Měl by být především dobře tvářitelný, aby během výroby nevznikaly vady.
- Ověření vyrobiteľnosti – jestli je součást jednoduše vyrobiteľná kovotlačením. V návrhu by neměla být žádná ostrá zaoblení a hluboká vnitřní osazení.
- Jednoduchost tvaru – zdali lze součást zhotovit konvenčním způsobem beze speciálních úprav technologie a vlastností formy.
- Využitelnost materiálu – snaha o co nejvyšší poměr využitého materiálu k odpadu.
- Ekonomičnosť – snaha o co nejnižší náklady na zhotovení požadovaného množství kusů.

3 NÁVRH VÝROBY

Součástí, zvolenou ke zpracování návrhu, je dusítko plunger mute (obr. 38). Je to rotační dutá nádoba s konstantní tloušťkou stěny 0,5 mm, výškou 72 mm a průměrem 160 mm. Dusítko je rukou přidržováno před korpusem trombonu. Vzhledem k povaze používání nejsou na jeho rozměrovou přesnost kladeny vysoké nároky, proto byla zvolena norma ČSN ISO 2768–cL. Jako vhodné materiály byly označeny měděné či hliníkové slitiny. Pro jejich zpracování v sérii 500 kusů se jako nejvhodnější způsob výroby jeví ruční kovotlačení.



Obr. 38 Model plunger mute.

Hliník a měď jsou prvky s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi. Oba se v drtivé většině případů slévají s dalšími, a tím vzniká nepřehledné množství slitin s nejrozmanitějšími chemickými a mechanickými vlastnostmi. Vzhledem ke specifickým požadavkům na vlastnosti dusítka byly uvažovány tyto slitiny:

- Mosaz – je slitina mědi, zinku a dalších legujících prvků. Mezi vyhovující materiály byly zařazeny:
 - CuZn37 – je dobře tvářitelná za studena, má menší odolnost vůči korozi než jiné mosazi s vyšším obsahem mědi, ale je pevnější. Je to nejběžnější mosaz na výrobu běžného kovového zboží např. pružiny, šrouby, matice a lamelové chladiče do aut. [35]
 - CuZn30 – díky svým vlastnostem je vhodná na výrobu tažených a lisovaných součástí, na výrobu hudebních nástrojů, pružin, šroubů do dřeva. Také se používá na lamelové chladiče automobilů kvůli své dobré odolnosti vůči korozi. [35]
- Bronz – je nejčastěji označení pro slitinu mědi a cínu. Měď se ovšem slévá i s dalšími prvky, podle kterých jsou vzniklé bronzové slitiny označovány jako hliníkové, manganové, niklové, olověné apod. Jako zástupci byly zvoleny slitiny [35]:
 - CuSn6 – je vhodná na části strojů, kde je požadována velká pevnost a dobrá odolnost proti korozi, tzn. na drobné kovové zboží a na kovová tkaniva, pružiny pro elektrické a měřicí přístroje, membrány a trubice manometrů, dráty a trubky na ložisková pouzdra atp. [35]

- CuAl5 – má velkou odolnost proti korozi, disponuje výbornou tažností a dobrou pevností. Používá se na výrobu pro chemický a papírenský průmysl mimo jiné i na brzdová zařízení. [35]
- Hliník – je chemický prvek s nízkou hustotou, ale relativně vysokou pevností a dobrou tažností. Jeho slitiny se často využívají v automobilovém, leteckém i chemickém průmyslu. Kvůli zajištění zachování tvářitelných vlastností byly uvažovány pouze tyto slitiny, které přirozeně nezpevňují a neprojevuje se u nich stárnutí [35]:
 - En AW – 1050A – má dobrou chemickou odolnost, je vhodný pro potravinářský i chemický průmysl a díky příměsím, které tvoří maximálně 0,5 hmotnostního procenta, se vlastnostmi blíží zcela čistému hliníku. [35]
 - En AW – 3103 – je slitina s manganem. Má velmi dobrou chemickou odolnost vůči atmosférické korozi a vykazuje velmi dobrou svařitelnost. Disponuje dobrou tvarovatelností lisováním, tažením i válcováním a hodí se pro střední zatížení. Slitina je vhodná pro chemický a potravinářský průmysl, výrobu tepelných výměníků, výparníků, chladičů motorů, různých obalů, trubek a tlakových nádob. [35; 36]

Mimo pevnost, zdravotní nezávadnost a korozivzdornost je jedním z nejdůležitějších požadavků na vlastnosti součásti nízká hmotnost. Hustota materiálu má na ni spolu s objemem přímý vliv. Pro zjednodušení výpočtu je hustota slitiny uvažována podle převažujícího prvku. Byly provedeny výpočty na zjištění hmotností dusítka z:

- mědi:

$$m_{\text{Cu}} = V \cdot \rho_{\text{Cu}} = 20,491 \cdot 8,94 = 183,19 \text{ g} \quad (3.1)$$

kde: V – objem navrženého dusítka z počítačového programu;

$$V = 20,491 \text{ cm}^{-3}$$

$$\rho_{\text{Cu}} - \text{hustota mědi; } \rho_{\text{Cu}} = 8,94 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

- hliníku:

$$m_{\text{Al}} = V \cdot \rho_{\text{Al}} = 20,491 \cdot 2,7 = 55,33 \text{ g} \quad (3.2)$$

kde: ρ_{Al} – hustota hliníku; $\rho_{\text{Cu}} = 2,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Po zvážení všech požadavků na vlastnosti součásti a výrobní požadavky, byla jako nejvhodnější zvolena hliníková slitina EN AW – 3103. Má dobrou pevnost, aby zajistila dlouhou životnost a kvalitu dusítka, je velmi odolná vůči atmosférické korozi i ve vlhkém prostředí a disponuje dobrou tvárností, která je nepostradatelná pro úspěšné provedení kovotlačení. V tab. 2 a 3 jsou popsány mechanické vlastnosti a chemické složení zvoleného materiálu.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti hliníkové slitiny En AW – 3103 H111 pro plech o tloušťce 0,5 mm [37].

| Pevnost v tahu R_m [MPa] | Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] | Tažnost A_{50} [%] |
|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| 130 | 35 | 17 |

Tab. 3 Chemické složení hliníkové slitiny En AW – 3103 [38].

| | | | | |
|--------|--------|--------|-----------|--------|
| Si [%] | Fe [%] | Cu [%] | Mn [%] | Mg [%] |
| 0,50 | 0,7 | 0,10 | 0,9 – 1,5 | 0,3 |
| Cr [%] | Zn [%] | Ti [%] | Ga [%] | Al [%] |
| 0,10 | 0,2 | — | — | Zbytek |

3.1 Polotovár

Kovotlačení využívá k výrobě zpravidla plechových polotovarů. Ke zhotovení dusítka byl zvolen plech o tloušťce 0,5 mm. Zpravidla se dodává jako tabule obdélníkového tvaru nebo ve svitku, ovšem ideálním tvarem polotovaru pro kovotlačení je kruh. Toho lze dosáhnout rozstříháním velké tabule tabulovými nůzkami na menší čtvercové kusy, které se poté upraví. Jako vhodné možnosti se jeví:

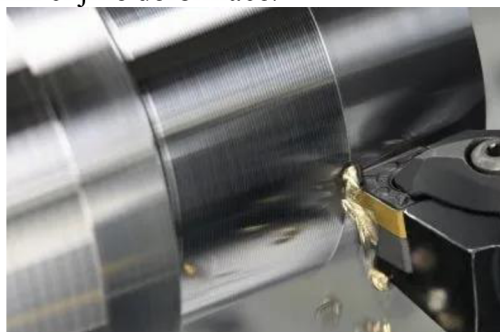
- Stříhání – je dělení materiálu pomocí dvojice břitů, v tomto případě kotoučovými nůzkami s využitím přípravku na výrobu kruhů (obr. 39). Je to jednoduchý a rychlý proces s dostačující přesností, ovšem nevýhodou je nutnost další operace a prodloužení manipulačních časů s materiálem.



Obr. 39 Kotoučové nůzky s přípravkem [39].

- Soustružení – je druhem třískového obrábění, kdy soustružnický nůž odděluje malé části rotujícího polotovaru (obr. 40). Protože se kovotlačení provádí na soustruhu nebo jemu podobném stroji, lze tvar plechu obrobít těsně před započítím tvářecí operace. Čtvercový přístřih se upne ke kovotlačitelské formě a následně se obrobí do kruhu o požadovaném průměru.

Tento postup ubírá operaci ostříhování, nevyžaduje další stroj a zkracuje manipulační čas. Úpravou přímo na stroji navíc odpadá následné středění polotovaru na kovotlačicí formu. Soustružit plech o tloušťce pouhých 0,5 mm je možné, ale běžně se využívá pouze pro jemnou úpravu průměru polotovaru. Rázy, vznikající obráběním čtvercového polotovaru, výrazně zkracují životnost nástroje a mohou způsobit vyosení polotovaru nebo dokonce i vznik trhlin či jiné deformace.



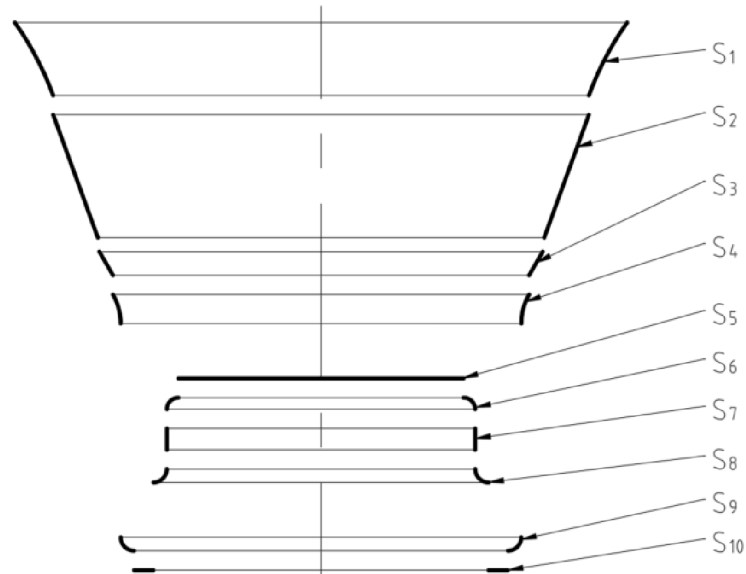
Obr. 40 Soustružení [40].

Kvůli vyššímu počtu požadovaných kusů (500) a kvůli rizikům, spojeným s obráběním tenkého čtvercového plechu, je bezpečnější využít kotoučové nůzky, které jsou mimo jiné běžnou součástí podniků.

3.1.1 Průměr polotovaru

Pro výrobu polotovaru je nutné znát jeho průměr, který se vypočítává z plochy dusítka. Protože během kovotlačení nedochází ke změně tloušťky stěny a platí zákon o zachování objemu, musí mít dusítko stejnou plochu jako polotovaru. Zjistit rozměr kruhového přístřihu plechu lze několika způsoby. Zde jsou uvedeny některé z nich:

- Rozdělením na základní plochy – způsob výpočtu, který zjednodušuje složitý tvar zhotovovaného dílce na menší a jednoduše vypočitatelné části, viz obr. 41. Kvůli zkrácení výpočtu byla nejmenší zaoblění připojena k větším plochám např. mezi plochou S_2 a S_3 .



Obr. 41 Rozdělení základních ploch dusítka.

Rozměry jednotlivých ploch jsou vztaheny ke středu plechu, protože pouze tam je zachována její původní velikost – v ostatních částech polotovaru ve skutečnosti dochází k natahování nebo stlačování materiálu. Jednotlivé plochy byly pomocí uvedených vzorců a kót (viz. obr. 42 až 51) vypočteny jako:

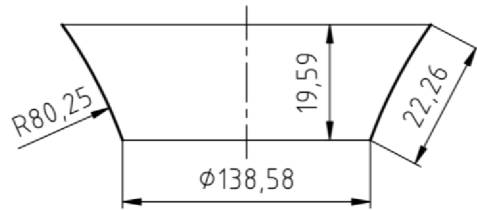
- Plocha 1:

$$\begin{aligned} S_1 &= \pi \cdot [(d + 2 \cdot r) \cdot f - 2 \cdot r \cdot h] = \\ &= 3,14 \cdot [(138,58 + 2 \cdot 80,25) \cdot 22,26 - 2 \cdot 80,25 \cdot 19,59] = \\ &= 11\,031,8 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

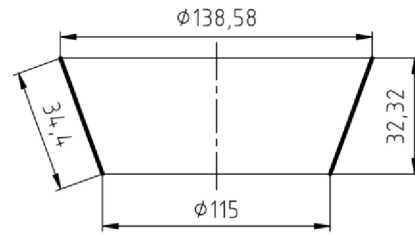
kde: d_i – průměr plochy
 r_i – poloměr zaoblění
 f_i – délka stěny/oblouku
 h_i – výška plochy

- Plocha 2:

$$\begin{aligned} S_2 &= \frac{\pi}{2} \cdot f \cdot (d + d_1) = \\ &= \frac{3,14}{2} \cdot 34,4 \cdot (138,58 + 115) = 13\,695,3 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$



Obr. 42 Plocha 1.



Obr. 43 Plocha 2.

- Plocha 3 (podle vzorce 3.4):

$$S_3 = \frac{\pi}{2} \cdot f \cdot (d + d_1) =$$

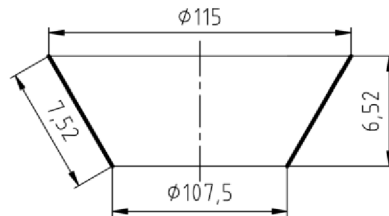
$$= \frac{3,14}{2} \cdot 7,52 \cdot (115 + 107,5) = 2\,626,9 \text{ mm}^2$$

- Plocha 4 (podle vzorce 3.3):

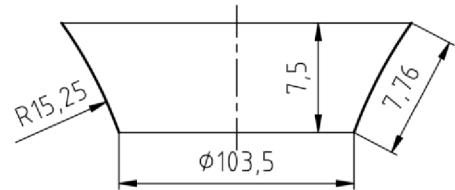
$$S_4 = \pi \cdot [(d + 2 \cdot r) \cdot f - 2 \cdot r \cdot h] =$$

$$= 3,14 \cdot [(103,5 + 2 \cdot 15,25) \cdot 7,76 - 2 \cdot 15,25 \cdot 7,5] =$$

$$= 2\,546,8 \text{ mm}^2$$



Obr. 44 Plocha 3.



Obr. 45 Plocha 4.

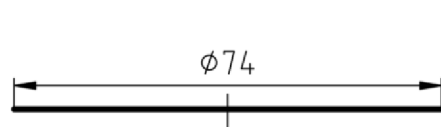
- Plocha 5:

$$S_5 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 74^2}{4} = 4\,298,7 \text{ mm}^2 \quad (3.5)$$

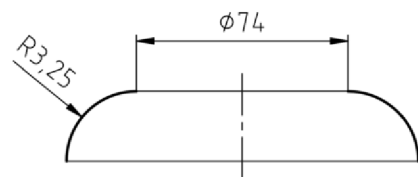
- Plocha 6:

$$S_6 = \frac{\pi}{2} \cdot (\pi \cdot d \cdot r + 4 \cdot r^2) = \quad (3.6)$$

$$= \frac{3,14}{2} \cdot (3,14 \cdot 74 \cdot 3,25 + 4 \cdot 3,25^2) = 1\,251,9 \text{ mm}^2$$



Obr. 46 Plocha 5.



Obr. 47 Plocha 6.

- Plocha 7:

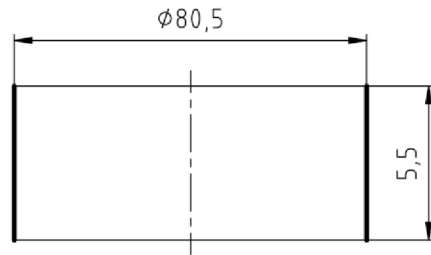
$$S_7 = \pi \cdot d \cdot h = \quad (3.7)$$

$$= 3,14 \cdot 80,5 \cdot 5,5 = 1\,390,2 \text{ mm}^2$$

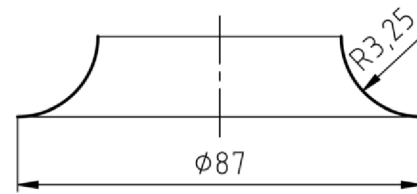
- Plocha 8:

$$S_8 = \frac{\pi}{2} \cdot (\pi \cdot d \cdot r - 4 \cdot r^2) = \quad (3.8)$$

$$= \frac{3,14}{2} \cdot (3,14 \cdot 87 \cdot 3,25 - 4 \cdot 3,25^2) = 1\,327,6 \text{ mm}^2$$



Obr. 48 Plocha 7.



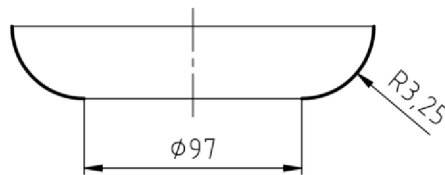
Obr. 49 Plocha 8.

- Plocha 9 (podle vzorce 3.6):

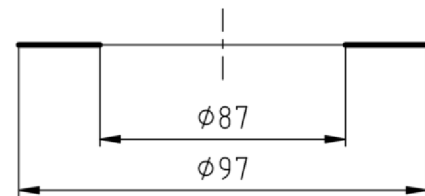
$$\begin{aligned}
 S_9 &= \frac{\pi}{2} \cdot (\pi \cdot d \cdot r + 4 \cdot r^2) \\
 &= \frac{3,14}{2} \cdot (3,14 \cdot 97 \cdot 3,25 + 4 \cdot 3,25^2) = 1\,620,5 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Plocha 10:

$$\begin{aligned}
 S_{10} &= \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - d_1^2) = \\
 &= \frac{3,14}{4} \cdot (97^2 - 87^2) = 1\,444,4 \text{ mm}^2
 \end{aligned} \tag{3.9}$$



Obr. 50 Plocha 9.



Obr. 51 Plocha 10.

Plocha polotovaru podle základních ploch se získá sečtením všech výše vypočtených dílčích ploch:

$$\begin{aligned}
 S_C &= \sum S_i = 11\,031,8 + 13\,695,3 + 2\,626,9 + 2\,546,8 + 4\,298,7 + \\
 &+ 1\,251,9 + 1\,390,2 + 1\,327,6 + 1\,620,5 + 1\,444,4 = 41\,234,2 \text{ mm}^2
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Průměr polotovaru podle základních ploch:

$$D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot S_C}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 41\,123,5}{3,14}} = 229,19 \text{ mm} \tag{3.11}$$

Po rozdělení dusítka na základní plochy vychází průměr polotovaru 229,19 mm. Pro další výpočty je výsledek zaokrouhlen na 229,2 mm.

- Pomocí počítačového programu – je přesnou a rychlou metodou, jak určit plochu dusítka a zároveň polotovaru. Aby byla zajištěna přesnost, je nutná precizně vymodelovaná součást. Ta byla navržena v CAD programu Inventor 2022 ze kterého byla zjištěna plocha a z ní vypočten průměr, stejně jako u vzorce 3.11 jako:

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 41\,958,095}{3,14}} = 231,192 \text{ mm},$$

kde: S_1 – plocha dusítka získaná z CAD modelu; $S = 41\,958,095 \text{ mm}^2$

Podle výpočtu z plochy, získané z programu Inventor vychází průměr polotovaru 231,192 mm. Pro další výpočty je zaokrouhlen na 231,2 mm.

Jako přesnější a bezpečnější varianta pro zjištění velikosti polotovaru byla zvolena metoda, počítající s plochou z programu Inventor. Kvůli zvýšení bezpečnosti a přídavku na úpravu obvodu součásti byl zjištěný průměr zvětšen o 3 %:

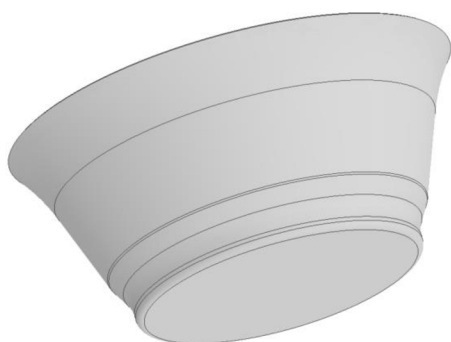
$$D = D_1 \cdot 1,03 = 231,2 \cdot 1,03 = 238,136 \text{ mm} \quad (3.12)$$

Průměr polotovaru byl stanoven pomocí plochy z počítačového programu Inventor 2022 a s přídavkem 3 % vychází 238,136 mm. Kvůli jednodušší výrobě a následujícím výpočtům byl zaokrouhlen na 239 mm.

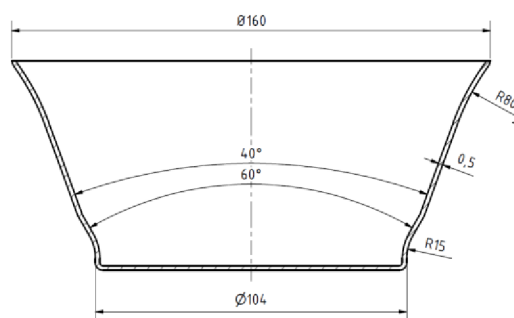
3.2 Zhodnocení technologičnosti

Na první pohled je dusítko ideální součást pro kovotlačení – celý výtlaček je tvořen rozevřajícími se rotačními plochami bez ostrých úhlů s konstantní tloušťkou stěny. Problémem je ovšem dno, které touto technologií nejde vyrobit současně s pláštěm. Je několik variant řešení, jak se s výrobou dna vypořádat:

- Úpravou návrhu součásti – změnou modelu (obr. 52), kde by se prolisované dno zcela vynechalo a bylo by nahrazeno rovnou plochou (obr. 53). Je to nejjednodušší způsob, jak se problému vyhnout a zachovala by se rychlá výroba pouze jednou operací. Ovšem nebude tak vyhověno původnímu zadání.

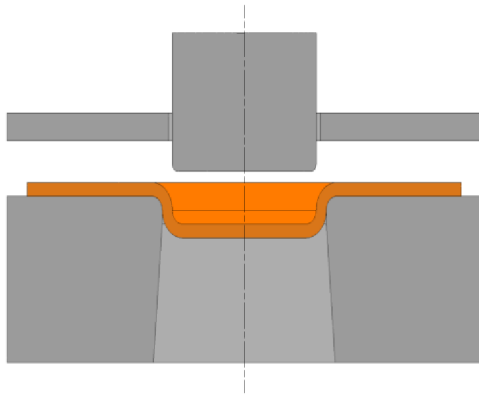


Obr. 52 Model s rovným dnem.

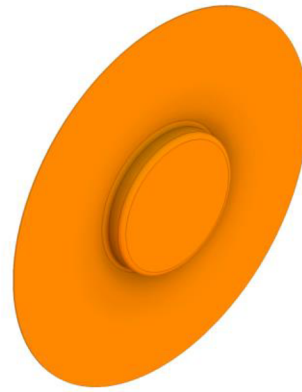


Obr. 53 Schéma s rovným dnem.

- Přidáním jiné technologie – prolis ve dně lze jednoduše zhotovit tažením (obr. 54). Byl by zhotoven polotovar s předhotoveným (obr. 55) dnem a plášť by byl následně dotvořen kovotlačením. Nevýhodou jsou náklady na pořízení nástroje a nutnost odpovídajícího lisu, což by výrazně prodražilo výrobu 500 kusů. Navíc by se prodloužily manipulační časy, kvůli přesunu materiálu od lisu ke kovotlačitelskému stroji.

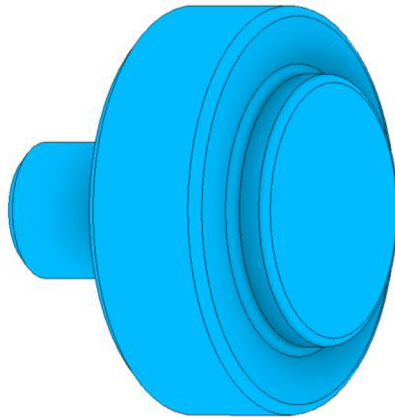


Obr. 54 Zobrazení tažení dna.

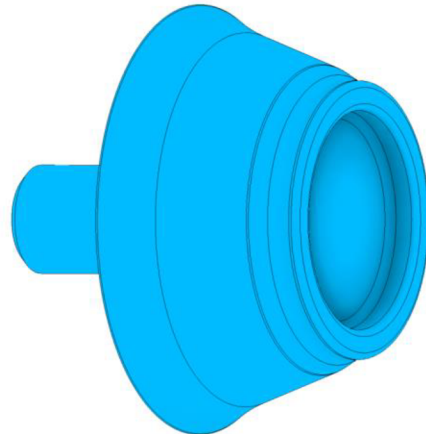


Obr. 55 Polotovar s předhotoveným dnem.

- Přidáním kovotlačicí operace – první operací by bylo samostatně zhotoveno dno a poté by byla vyměněna forma a následující druhou operací by byl plášť dusítka dokončen. Výhodou je, že obě operace lze uskutečnit na jednom stroji a manipulační časy se prodlouží jen minimálně. Nevýhodou je nutnost pořízení dvou kovotlačitelských forem, viz obr. 56 a 57.



Obr. 56 Forma 1. operace.



Obr. 57 Forma 2. operace.

Každá varianta má své výhody a nevýhody, ale z pohledu vyhovění zadání a ceně výroby se jako nejlepším řešením zdá být možnost s kovotlačitelskými operacemi. Kvůli rychlejší výrobě by bylo vhodné provést první operaci na všech polotovarech, následně by byla vyměněna forma a pokračovalo by se druhou operací, a to dokončením pláště.

Dalším krokem návrhu je ověření technologických parametrů výroby. Tvářitelnost materiálu má své limity, při jejichž překročení vznikají vady ve výtažku – proto je nutné dodržet určité zásady. Prověřuje se:

- Stupeň přetvoření – pro výtlčky ze slitin hliníku je jeho maximální hodnota $K_{\max} = 2$ až 2,5 pro jednu operaci. Tvary přesahující zvolenou hodnotu je nutné vyrábět na více operací s mezioperačním žíháním kvůli obnově plasticity. [13]

Výpočet stupně přetvoření dle vzorce 2.1:

$$K_{\max} > K$$

$$2 > 1,49375$$

kde: K_{\max} – maximální stupeň přetvoření; zvolen $K_{\max} = 2$

K – stupeň přetvoření dle vzorce 2.2:

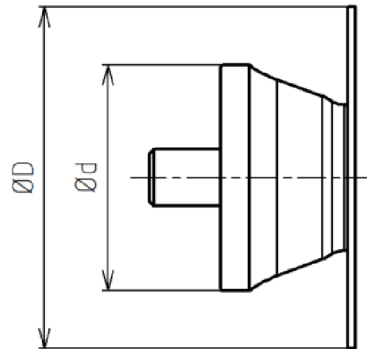
$$K = \frac{D}{d} = \frac{239}{160} = 1,49375$$

kde: D – průměr polotovaru (obr. 58);

$$D = 239 \text{ mm}$$

d – průměr formy ve druhé operaci (obr. 58);

$$d = 160 \text{ mm}$$



Obr. 58 Forma s polotovarem.

Vypočtený stupeň přetvoření byl vypočten jako 1,49375, což splňuje i přísně zvolený maximální stupeň přetvoření s hodnotou 2.

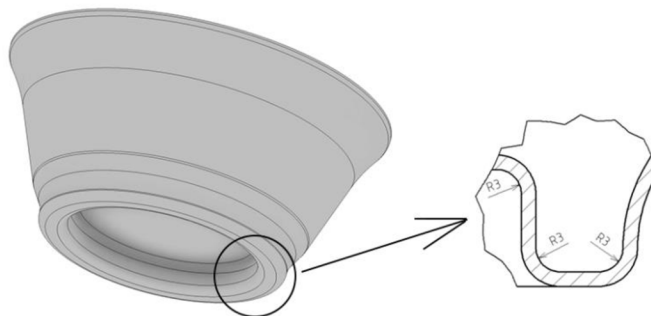
- Nejmenší zaoblení – u kovotlačení beze změny tloušťky stěny se o limitech zaoblení nepíše, proto se výpočet inspiroval tažením. Nejmenší zaoblení bylo vypočteno jako [13]:

$$R_{\min} = k \cdot t = 5 \cdot 0,5 = 2,5 \text{ mm} \quad (3.13)$$

kde: t – tloušťka stěny výtlačku; $t = 0,5 \text{ mm}$

k – součinitel zaoblení; je zvolen na základě zkušeností z literatury [13]: $k = 5$

Dusítko je podle stupně přetvoření a podle nejmenšího zaoblení výrobitelné. Nejmenší rádius modelu se ovšem rovná jeho nejmenší přípustné vypočítané hodnotě. Kvůli snížení rizika výroby neshodných kusů se zadáním je vhodné nejmenší rádius upravit – ze zaoblení R2,5 na R3 (obr. 59).



Obr. 59 Upravené rádiusy.

Důsledkem změny zaoblení je třeba přepočítat a zkontrolovat plochu i průměr polotovaru, tentokrát už pouze pomocí počítačového programu a vzorce 3.11:

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 41\,778,437}{3,14}} = 230,697 \text{ mm},$$

kde: S – plocha dusítka z modelu v Inventoru; $S = 41\,778,437 \text{ mm}^2$

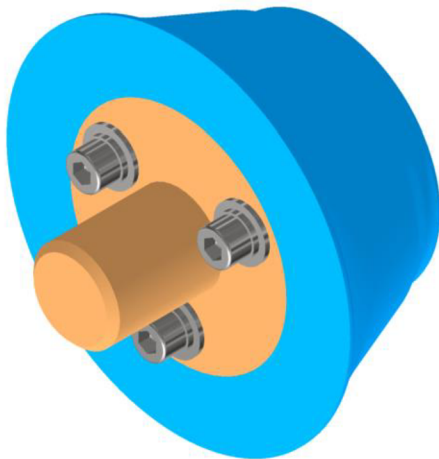
Přídavek 3 % pro zvýšení bezpečnosti výroby a pro úpravu okrajů součásti podle 3.12:

$$D = D_1 \cdot 1,03 = 230,7 \cdot 1,03 = 237,621 \text{ mm}$$

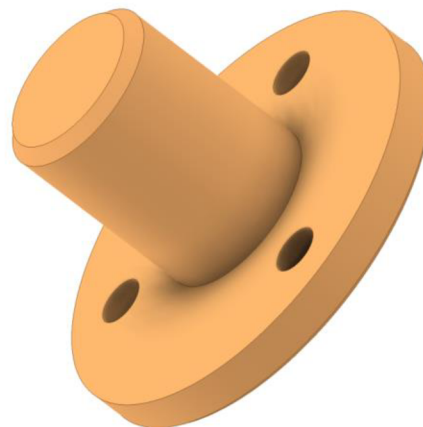
Přepočítaný průměr polotovaru odpovídá 237,621 mm, což je od původního výpočtu zanedbatelná změna. Proto se uvažovaná velikost polotovaru nemění, tedy $D = 239 \text{ mm}$.

3.3 Výrobní nástroje

Pro ruční výrobu je třeba navrhnout výrobní pomůcky. Nejzákladnější a první navrhovanou je forma (obr. 60). Aby byl nástroj celkově koncepčně levnější a byl vhodný z ekonomického hlediska, byla zvolena konstrukce, která kombinuje upínák s vyměnitelnými formami. Upínák (obr. 61) je rotační součást s přírubou o průměru 100 mm a čepem 40 mm, jež slouží jako upínací plocha pro sklíčidlo kovotlačitelského stroje, a protože nejběžnější jsou tříčelist'ová, v přírubě jsou na průměru 70 mm vyvrtány tři díry pro šrouby M10.

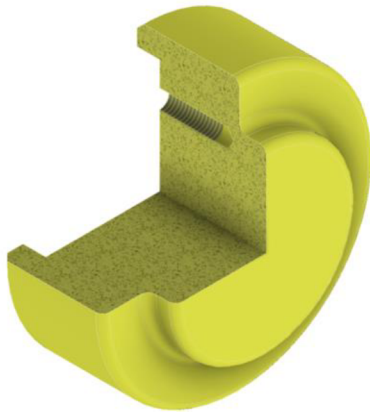


Obr. 60 Sestava formy.

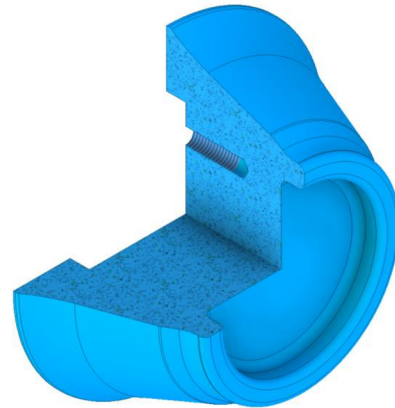


Obr. 61 Model upínáku.

K upínáku byly navrženy vyměnitelné formy pro první a druhou operaci, které se k němu připojují pomocí neprůchozích závitových otvorů, polohou odpovídajícím děrám v jeho přírubě. Funkcí první formy (obr. 62) je pouze vytvarování dna dusítka. Proto má osazení hloubku 12 mm s průměrem 80 mm. Vnější válcová plocha není funkční, a proto má průměr pouze 120 mm. Druhá vyměnitelná forma (obr. 63) je dokončovací – má tvar dutiny výrobku. Velký průměr formy je 160 mm. Materiálem obou vyměnitelných dílců, stejně jako upínáku, je konstrukční ocel 12 050, ovšem povrch výměnných forem se zakalí alespoň na 49 HRC.

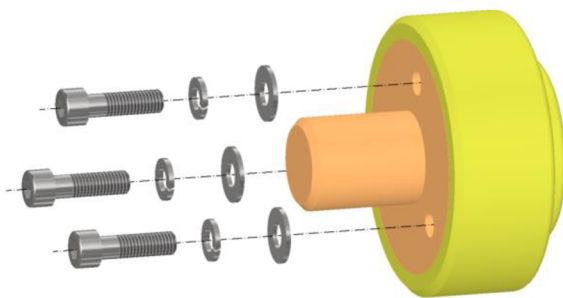


Obr. 62 Výměnná forma 1.

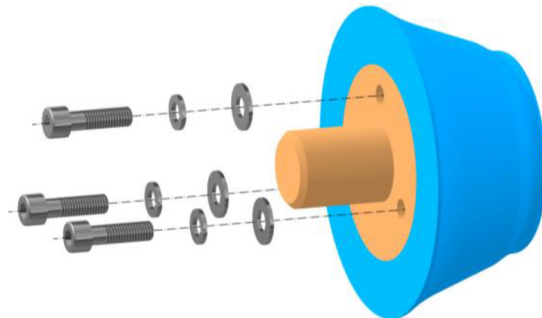


Obr. 63 Výměnná forma 2.

Obě formy jsou s upínákem spojeny válcovými šrouby (obr. 64 a 65). Během kovotlačení vznikajícím vibrace, které by mohly způsobit jejich povolání, a proto jsou kvůli bezpečnosti pojištěny pružnými podložkami.



Obr. 64 Sestava formy 1.



Obr. 65 Sestava formy 2.

Pro bezchybnou výrobu je třeba znát otáčky, na které se má nastavit stroj. Vychází se z doporučených obvodových rychlostí matrice pro hliníkovou slitinu [13]. Spočítají se ze vzorce:

$$n_1 = \frac{v_{Al} \cdot 1000}{\pi \cdot d_1} = \frac{100 \cdot 1000}{3,14 \cdot 120} = 265,4 \text{ min}^{-1} \quad (3.14)$$

kde: v_{Al} – obvodová rychlost pro slitiny hliníku; $v_{Al} = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ [13]
 d_1 – průměr formy první operace; $d_1 = 120 \text{ mm}$

Otáčky při první tvářecí operaci vyšly $265,4 \text{ min}^{-1}$. Nastavit takto přesné otáčky dokážou jen vyspělé stroje, jejichž zařízení se kvůli výrobě dusítek nevyplatí. Pokud stroj nedisponuje tak přesným nastavením otáček, je doporučeno nastavit nejbližší možné nižší otáčky.

Otáčky druhé formy se také počítají ze vzorce 3.14 jako:

$$n_2 = \frac{v_{Al} \cdot 1000}{\pi \cdot d} = \frac{100 \cdot 1000}{3,14 \cdot 160} = 200 \text{ min}^{-1}$$

kde: d – průměr formy druhé operace; $d = 160 \text{ mm}$

Otáčky při druhé tvářecí operaci vyšly 200 min^{-1} . Platí zde stejné pravidlo, jako u první operace.

Z výše uvedených výpočtů jsou zřejmé přesné otáčky, na které se má nastavit stroj. Jsou to pouze doporučené otáčky, protože v praxi se nejčastěji zjišťují experimentálně. Maximální obvodová rychlost formy je pro hliníkové slitiny je mnohem vyšší, než doporučená literaturou [13], viz. tab. 1.

Další, zcela nezbytnou výrobní pomůckou pro ruční kovotlačení, je sada paliček (obr. 66). Jsou to kovotlačicí nástroje, které provádí samotné tváření. Velmi důležitá je jejich geometrie, která určuje vhodnost pro konkrétní operace. Požadovaným materiálem paliček je ocel – spojuje dobrou životnost a rozumnou cenu. Kvůli úspoře času se paličky koupí od firmy Union hill antique tools, jejíž produkty jsou zobrazeny na obr. 66.



Obr. 66 Sada paliček [41].

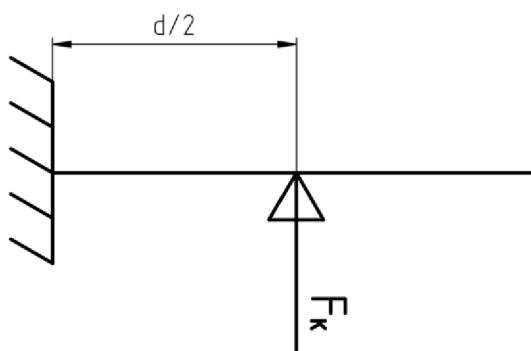
3.4 Síly

Ruční kovotlačení je proces, při kterém jsou nástroje vedeny člověkem. Podmínkou tohoto způsobu výroby je, že polotovar se tvaruje při malých silách, které je operátor schopen bez problémů vyvinout. Výpočet přesných hodnot je složitý, a navíc se parametry výroby během procesu mění např. průměr, na kterém působí nástroj. Proto bylo přistoupeno k určitým zjednodušením, které výpočet usnadní. Síla se stanovuje ze dvou složek:

- Kovotlačicí – je uvažována jako ohybová síla, která deformuje materiál. Polotovar je uchycen mezi formou a koníkem – proto je materiál uvažován jako vetknutý (obr. 67). Největší síla je vyvíjena nejbliže středu výtlačku kvůli nejkratšímu rameni ohybového momentu – při tváření dna a počítá se jako:

$$F_K = \frac{M_O}{\frac{d_d}{2}} = \frac{1\,942,2}{\frac{81}{2}} = 48\text{ N} \quad (3.15)$$

kde: d_d – průměr prolisovaného dna i s plechem; $d_d = 81\text{ mm}$
 M_O – ohybový moment; $M_O = 1\,942,2\text{ N} \cdot \text{mm}$



Obr. 67 Schéma ohybové síly.

Pro výpočet ohybového napětí je maximální ohybové napětí uvažováno jako 1,5 násobek meze pevnosti v tahu. Tah, jako jednoosá napjatost, je z hlediska tváření nejméně vhodným způsobem namáhání. Z tohoto předpokladu bylo odvozeno, že maximální ohybové napětí je vyšší než tahové. Ohybový moment byl spočítán jako:

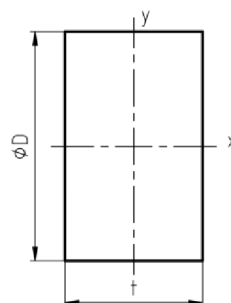
$$M_O = \sigma_O \cdot W_O = 195 \cdot 9,96 = 1\,942,2 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (3.16)$$

kde: σ_O – mez pevnosti v ohybu, kvůli dimenzování zvolena

$$\text{jako: } \sigma_O = 1,5 \cdot R_m = 1,5 \cdot 130 = 195 \text{ MPa} \quad (3.17)$$

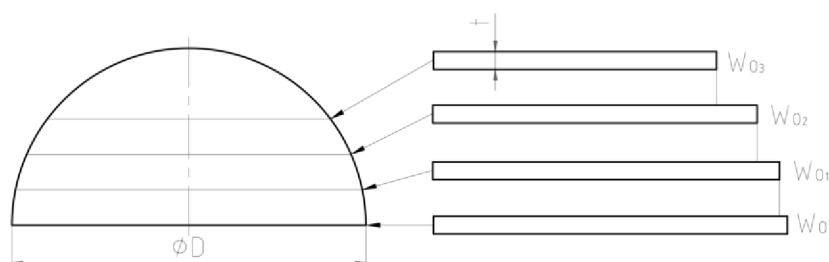
W_O – modul průřezu v ohybu, kvůli dimenzování zvolen
výpočet pro obdélník (obr. 68);

$$\begin{aligned} W_O &= \frac{J_y}{e_y} = \frac{\frac{1}{12} \cdot t^3 \cdot D}{\frac{t}{2}} = \frac{1}{6} \cdot t^2 \cdot D = \\ &= \frac{1}{6} \cdot 0,5^2 \cdot 239 = 9,96 \text{ mm}^3 \end{aligned} \quad (3.18)$$



Obr. 68 Schéma k výpočtu modulu průřezu v ohybu [42].

Ač je každý modul průřezu v ohybu u kruhového plechu jiný, jak je vidět na obr. XX, tak je uvažován ve všech průřezích polotovaru stejný.



Obr. 69 Schéma modulů ohybového momentu.

- Třecí – je dána velikostí normálové síly působící na polotovar a materiály styčných ploch. Byla vypočítána jako:

$$F_T = f \cdot F_N = 0,47 \cdot 48 = 22,6 \text{ N} \quad (3.19)$$

kde: f – dynamický součinitel tření pro nemazaný hliník – ocel;

$$f = 0,47 [43],$$

F_N – normálová síla; $F_N = F_K = 48 \text{ N}$.

Celková síla byla nahrazena maximální působící silou na výtlaček. Z důvodu bezpečnosti byla vypočítána jako skalární součet, i když jsou jinak orientované.

$$F = F_K + F_T = 48 + 22,6 = 70,6 \text{ N} \quad (3.20)$$

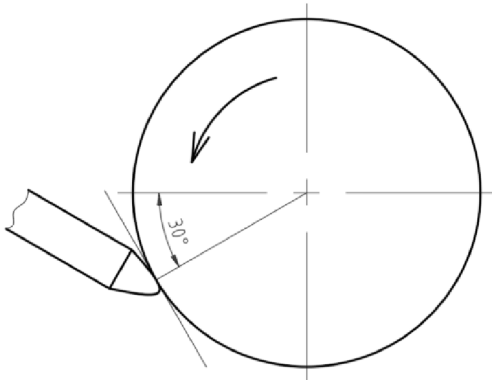
Maximální vypočtená síla, která by se mohla během kovotlačení objevit, byla vypočtena na 70,6 N, což je velmi nízké číslo, které je pro ruční kovotlačení vhodné. Takto malá síla je způsobena především velmi tenkou stěnou polotovaru, která se velmi jednoduše tváří.

3.5 Upnutí polotovaru

Polotovar je uchycen mezi formu a přítlačný element, který se opírá o pinolu koníku. Musí na něj působit dostatečně velkou přítlačnou silou, aby materiál zůstal pevně upnut i přes působení tvářecích a odstředivých sil. Protože na polotovaru dusítka není žádný tvarový prvek, pomocí kterého by se dal přesně a rychle rozeznat střed, musí být plech vycentrován.

Je velmi důležité upnout polotovar již zpočátku co nejvíce do středu, aby při vlastním středění vytvářel co nejmenší házení (vibrace), tzn. obsluha vhodně upne polotovar mezi formu a přítlačný element, ale jen malou silou, aby bylo možné polotovar posouvat. Zaměstnanec poté roztočí stroj a chopí se vystředovacího nástroje, který opře o opěrnou lištu. K tomuto účelu používá obsluha, např. tyčku s plochým čelem z tvrdého dřeva, dřevěnou paličku s plochým čelem nebo i rovnou část madla paličky. Dělník pomalu přibližuje nástroj k polotovaru, kolmo k jeho ose otáčení, dokud polotovar nezačne dřít o nástroj. Nejlepším místem ke kontaktu nástroje s polotovarem je „na sedmé hodině“ (obr. 70 a 71), ale vhodné je téměř jakékoli místo pod osou otáčení. Dělník poté začne tlačit na polotovar a tím ho postupně posouvá do středu. Orientuje se sluchem podle frekvence „škrtání“ o polotovar, které vzniká přejížděním nástroje po nestejně vzdálených okrajích plechu. V momentě, kdy nástroj dře bez přerušování, je polotovar vystředěn a operátor na pevně upne polotovar ke stroji [33].

Může se stát, že dělník zatlačí na polotovar více, než je schopna udržet přítlačná síla a polotovar se výrazně vyosí. V tomto případě je nutné vypnout stroj, znovu upnout polotovar zhruba na střed a celý proces opakovat [33].



Obr. 70 Poloha nástroje při centrování [33].



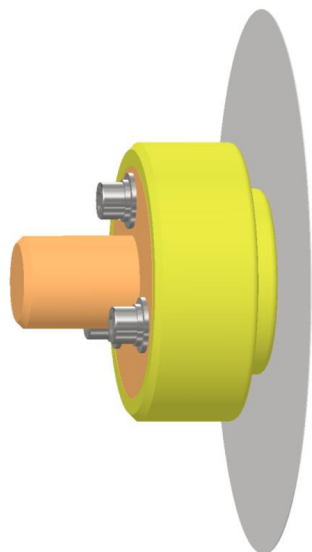
Obr. 71 Středění v praxi [44].

3.6 Postup

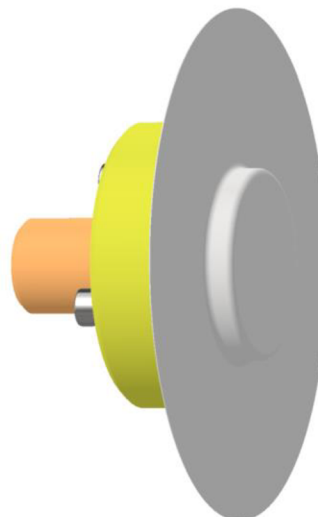
Výroba dusítka začíná vyhotovením polotovaru. Nejprve se rozstříhá tabule plechu na čtverce, které je třeba dále upravit do kruhového tvaru o průměru 239 mm pomocí kotoučových nůžek.

Dále je polotovar centrován a upnut do formy postupem popsáním v kapitole 3.5. (obr. 72). Tvářený hliníkový materiál je namazán mýdlovým přípravkem – běžně se používá i obyčejný mycí přípravek.

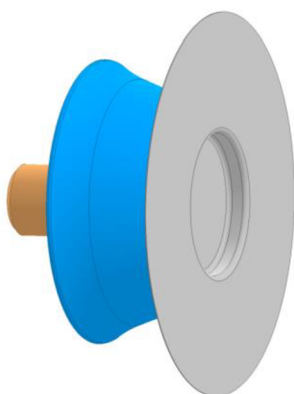
První kovotlačicí operace, při které dochází k vyhotovení dna dusítka, viz obr. 73. Poté přichází na řadu výměna formy – přemontování upínáku z první na druhou. Upínání polotovaru tentokrát nevyžaduje centrování, protože dno vytvořené předchozí operací zapadá do druhé formy (obr. 74). Je přistoupeno k druhé kovotlačicí operaci, při níž dochází k vyhotovení pláště dusítka, viz obr. 75.



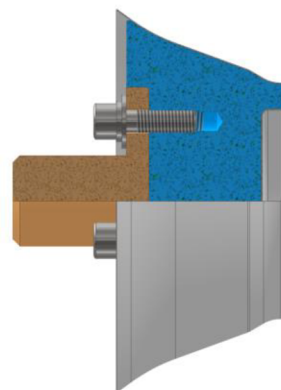
Obr. 72 Upnutí polotovaru do 1. formy.



Obr. 73 Zhotovení dna.



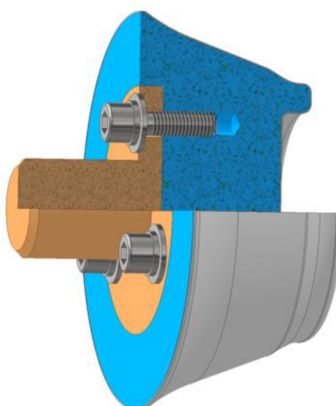
Obr. 74 Upnutí polotovaru do 2. formy.



Obr. 75 Zhotovení pláště.

Na konec přichází na řadu upichovací operace, při níž je odstraněn nadbytečný plech, který byl vytlačen za hranu formy. Zcela poslední operací je odjehlení obrobeneé hrany. K tomu vhodnými nástroji jsou pilník či hrubý smirkový papír. Tímto je dusítko hotové (obr. 76) a může se sejmut z formy.

Kvůli vyšší výrobnosti je vhodné tvářet více kusů za sebou, aby se předešlo nadbytečným výměnám formy



Obr. 76 Finální výrobek.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit návrh výroby dusítka trombonu typu plunger mute. Tvarem je to komplikovaná rotační nádoba s konstantní tloušťkou stěny 0,5 mm, s prolisovaným dnem a rozevírajícím se pláštěm. Počet kusů k výrobě byl stanoven na 500. Z rozboru možných technologií splňující požadavek na levnou, přesnou, rychlou a jednoduchou výrobu s minimálním podílem odpadu bylo zvoleno kovotlačení.

Při ověření technologičnosti bylo konstatováno, že prolisované dno a plášť dusítka nejde zhotovit pouze jednou operací. Z předložených variant bylo zvoleno kovotlačení na dvě operace. Požadavkům technologičnosti dále nevyhovovala některá zaoblení, proto byla zvětšena na R3.

Proběhla volba vhodného materiálu, který splňuje požadavky na dostatečnou pevnost a tvářitelnost, nízkou hmotnost, zdravotní nezávadnost a korozivzdornost. Byly uvažovány elastomery, plasty, měděné a hliníkové slitiny. Nejlepším materiálem, splňujícím všechny požadavky, byla zvolena hliníková slitina EN AW – 3103. Jako polotovar byl určen kruhový plech s průměrem 239 mm, pro jehož výrobu byly zvoleny kotoučové nůžky.

Dále byly zkonstruovány a výkresovou dokumentací podloženy formy pro obě kovotlačitelské operace. Kvůli úspoře byly navrženy ze dvou částí – vyměnitelných tvarových forem a upínáku. Jednotlivé části jsou spojeny šrouby a pojištěny pružnými podložkami. Kvůli prodloužení životnosti se povrch forem kalí, a proto je navrženým materiálem kalitelná uhlíková ocel 12 050. Nástroji nutnými pro ruční kovotlačení jsou (mimo forem) paličky. Z důvodu úspory času bylo přistoupeno k zakoupení sady ocelových paliček od firmy Union hill antique tools.

Na závěr byl navržen výrobní postup zhotovení dusítka ručním kovotlačením. Začíná upnutím materiálu, který je následně namazán mýdlovým přípravkem a je provedena první kovotlačicí operace na zhotovení dna. Po ní je výtlaček sňat, forma vyměněna a polotovar znovu upnut. Po opětovném mazání následuje dokončení součásti druhou kovotlačicí operací zakončenou upíchnutím přebytečného materiálu a odjehlením.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BLIGH, Curtis, 2018. *Metal spinning advantages and disadvantages*. Online. Excell metal spinning. 2023. Dostupné z: <https://www.excellmetalspinning.com/metal-spinning-advantages-and-disadvantages/>. [cit. 2024-04-04].
2. *Hera-shibori: Metal Spinning*, b.r. Online. In: Web Japan. 2020. Dostupné z: https://web-japan.org/trends/11_tech-life/tec130128.html. [cit. 2024-04-04].
3. *Metal spinning parts*, b.r. Online. In: Letiptop. Dostupné z: <https://metalspinningmachine.com/metal-spinning-parts/metal-spinning-parts.html>. [cit. 2024-05-08].
4. *King 3BLG tenor trombone...* Online. In: Gear4music. b.r., 2024. Dostupné z: <https://www.gear4music.cz/cs/Dechovej-mosaz-etzc/King-3BLG-Tenor-Trombone-Bronze-Bell-and-Lightweight-Slide/2KOO>. [cit. 2024-05-13].
5. *Mutes*, b.r. Online. Denis Wick. Dostupné z: <https://www.deniswick.com/product-category/mutes/>. [cit. 2024-02-18].
6. MAKES, Russell, b.r. *Trying SPIF - Single Point Incremental Forming*. Online. In: YouTube. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=nM47ukoKTiQ>. [cit. 2024-04-14].
7. *Průvodce svařovacími metodami: MIG/MAG, TIG a MMA*, c2024. Online. In: Profigaráž. Dostupné z: <https://www.profigaraz.cz/profi-poradna/pruvodce-svarovacimi-metodami--mig-mag--tig-a-mma/>. [cit. 2024-04-14].
8. ŠTANCL, Jiří. *Výroba součástí z plechu pomocí technologie HMT*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Ladislav Žák, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66232. [cit. 2024-05-18].
9. TIŠNOVSKÝ, Miroslav, 1990. *Hluboké tažení plechu na lisech*. Knižnice technických aktualit. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury. ISBN 80-030-0221-4.
10. *Hydraulic press...*, 2023. Online. In: YouTube. Dostupné z: <https://www.youtube.com/shorts/y4c3KtxMj6U>. [cit. 2024-03-28].
11. TŮMA, Martin, 2008. *Technologie využívající kapaliny jako tvářecího média*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Eva Šmehlíková. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4850. [cit. 2024-04-15].
12. *Deep Draw Hydroforming...*, b.r.. Online. In: YouTube. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=vMwi5UBCCM0&t=30s>. [cit. 2024-03-18].
13. DVOŘÁK, Milan; NOVOTNÝ, Karel a GAJDOŠ, František, 2003. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-2340-4
14. *Kovotlačitelství Hömig s.r.o.*, b.r.. Online. In: Zlaté stránky. Dostupné z: <https://www.zlatestranky.cz/profil/H841908/fotogalerie/profilova#photo-00>. [cit. 2024-03-21].
15. KANTOR, Miroslav, 2013. *Nástroje pro smykové tlačení*. Online, Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66742. [cit. 2024-03-21]
16. *Metal spinning (Metal spinners)*, b.r.. Online. In: IQS Directory. Dostupné z: <https://www.iqsdirectory.com/articles/metal-spinning.html>. [cit. 2024-05-08].
17. *Metal Forming & Machining Capabilities*, b.r.. Online. In: JD Burford. Dostupné z: http://www.jdburford.co.uk/metal_forming_machining.html. [cit. 2024-05-08].

-
18. *Helander metal spinning company*, b.r.. Online. In: YouTube. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=hTyAUWIM9LY>. [cit. 2024-04-04].
 19. KUT, S.; STACHOWICZ, F.; RYZINSKA, G. a MRUGAŁA, T., 2017. Experimental Research on the Impact of Thin-Wall Ratio and the Fillet Radius of Forming Roller on the Limiting Spinning Ratio of AMS 5504 Sheets. Online. *Journals PAS*. Roč. 2017, č. 4, s. 2261-2266. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0333>. [cit. 2024-05-08].
 20. *Heads*, b.r.. Online. In: G & G Metal Spinning. Dostupné z: <https://ggmetalspinners.com/products/heads/>. [cit. 2024-05-08].
 21. *Metal spun domes*, b.r.. Online. In: MetSpin. 2024. Dostupné z: [https://metspin.com/domes/#iLightbox\[image_carousel_1\]/5](https://metspin.com/domes/#iLightbox[image_carousel_1]/5). [cit. 2024-05-08].
 22. *Metal Spinning (Forming) Solid Lubrication Wax Bars*, b.r.. Online. In: Metal Spinning Machines, Flow Forming Machines & Related Metal Forming Machinery. 2024. Dostupné z: <https://globalmetalspinning.com/lubricants/>. [cit. 2024-05-08].
 23. *Spindle speed or spinning linear speed of metal spinning machines*. Online. Prosper metal forming. 2020. Dostupné z: <https://prospermachine.com/news/company-news/109.html>. [cit. 2024-05-19]
 24. *Metal spinning mandrel ready for woodturning...*, 2010. Online. In: Industrial arts. Dostupné z: http://2.bp.blogspot.com/_4nG-iaIVxU0/TFnKGa8d69I/AAAAAAAAAW4/TfLFymuajys/s1600/Metal+Spinning+028.jpg. [cit. 2024-05-08].
 25. *Leading Titanium Spinning Manufacturers*, b.r.. Online. In: IQS Directory. Dostupné z: <https://www.metal-spinners.net/titanium-spinning/>. [cit. 2024-05-08].
 26. NOVOTNÝ, Karel, 1992. *Tvářecí nástroje*. Brno: Vysoké učení technické. ISBN 80-214-0401-9.
 27. *Metal spinning 101: A guide*, b.r.. Online. In: Metal craft spinning and stamping. 2024. Dostupné z: <http://www.metalcraftspinning.com/metal-spinning/>. [cit. 2024-05-08].
 28. *Metal spinning (Metal spinners)*, b.r.. Online. In: IQS Directory. Dostupné z: <https://www.iqsdirectory.com/articles/metal-spinning.html>. [cit. 2024-05-08].
 29. *Metal Spinning Tools*, 2013. Online. In: Metal spinning. Dostupné z: <http://metalspinning.weebly.com/metal-spinning-tools.html>. [cit. 2024-05-08].
 30. DUBECKÝ, Lukáš, 2018. ... *konstrukční návrh... válečkového dopravníku...* Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Jiří Mrázek, Ph.D. Praha: České vysoké učení technické. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80505/F2-DP-2018-Dubecsky-Lukas-DP%20Dubecsky.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. [cit. 2024-04-04].
 31. *Metal spinner's beading tool completed*, 2017. Online. In: Industrial arts. Dostupné z: <http://earlcpowell.blogspot.com/2017/07/metal-spinners-beading-tools-completed.html>. [cit. 2024-05-08].
 32. *Manual metal spinning lathe for 800mm...*, 2004. Online. In: Stangroup. 2022. Dostupné z: https://stangroup.us/index.php?route=product/product&product_id=98. [cit. 2024-05-08].
 33. BLIGH, Curtis, 2020. *A beginner's guide to the metal spinning process*. Online. Excell metal spinning. 2023. Dostupné z: <https://www.excellmetalspinning.com/a-beginners-guide-to-the-metal-spinning-process/>. [cit. 2024-05-08].
 34. *CNC metal spinning machine manufacturer...*, b.r.. Online. Dymetal spinning. 2023. Dostupné z: <https://dymetalspinning.com/metal-spinning-machine/>. [cit. 2024-05-08].
 35. BENEŠ, Antonín. In: *Kovové materiály vlastnosti a použití*. Praha 1: SNTL, 1968, s. 471-580. ISBN 04-410-67.
-

-
36. *Značení slitin hliníku*. Online. ALU A-Z S.R.O. Prodej Al polotovarů. b.r. Dostupné z: <https://aludecin.cz/znaceni-slitin-hliniku>. [cit. 2024-05-20].
 37. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 485-2+A1, *Hliník a slitiny hliníku - Plechy, pásy a desky - Část 2: Mechanické vlastnosti*. 2019.
 38. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 573-3+A1, *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*. 2023.
 39. AAMARKET. *Přípravek pro stříhání kruhů KV 098 RS*. Online. B.r. Dostupné z: <https://www.aamarket.cz/pripravek-pro-strihani-kruhu-kv-098-rs-p1697>. [cit. 2024-05-23].
 40. SANDVIK COROMANT. *Všeobecné soustružení*. Online. B.r. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning>. [cit. 2024-05-23].
 41. UNION HILL ANTIQUE TOOLS. *Metal spinning tools set*. Online. B.r. Dostupné z: <https://www.finetools.com/product-page/metal-spinning-tools-set-3>. [cit. 2024-05-24].
 42. SVOBODA, Jaroslav. *Mechanika, pružnost pevnost*. Online. 2013. Dostupné z: https://www.sokolska.cz/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_11-10.pdf. [cit. 2024-05-22].
 43. KRATINA, Jakub. *Součinitel tření*. Online. E-konstruktor. 2013. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>. [cit. 2024-05-22].
 44. *Zkouška kovotlačení (kovotlačitelství) [@Mirek Dvořák - Neboj se toho]*. Online. 2024. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=HMJuGoJaa0g&t=1097s>. [cit. 2024-05-23].
 45. SAMEK, Radko; ŠMEHLÍKOVÁ, Eva a LIDMILA, Zdeněk. *Speciální technologie tváření*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-214-4406-52.
 46. TSCHATTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes - machines - tools*. New York: SpringerVerlag, 2006. ISBN 978-3-540-33216-9.
 47. MARCINIAK, Zdislaw; DUNCAN, John L. a HU, Jack S. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. 2. vyd. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 07-506-5300-00.
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

| Označení | Legenda | Jednotka |
|-------------|--|------------------------|
| A_{50} | tažnost | [%] |
| D | průměr polotovaru | [mm] |
| D_I | průměr z Inventoru | [mm] |
| D_p | průměr z ploch | [mm] |
| d | Průměr formy | [mm] |
| d_d | průměr prolisovaného dna | [mm] |
| d_i | průměr plochy | [mm] |
| F_K | kovotlačící síla | [N] |
| F_N | normálová síla | [N] |
| F_T | třecí síla | [N] |
| f | součinitel tření | [-] |
| f_i | délka stěny/oblouku | [mm] |
| h_i | výška plochy | [mm] |
| K | stupeň přetvoření | [-] |
| K_{max} | maximální stupeň přetvoření | [-] |
| k | součinitel zaoblení | [-] |
| M_o | ohybový moment | [N·mm] |
| m_{Al} | hmotnost tělesa z hliníku | [g] |
| m_{Cu} | hmotnost tělesa z mědi | [g] |
| n | otáčky | [min ⁻¹] |
| R_{min} | nejmenší zaoblení | [mm] |
| R_m | mez pevnosti v tahu | [MPa] |
| $R_{p0,2}$ | smluvní mez kluzu | [MPa] |
| r_i | poloměr zaoblení ploch | [mm] |
| S | plocha | [mm ²] |
| S_C | celková plocha polotovaru z jednotlivých ploch | [mm ²] |
| T | přesnost | [mm] |
| t | tloušťka stěny | [mm] |
| V | objem | [mm ³] |
| v_{Al} | doporučená obvodová rychlost | [m·min ⁻¹] |
| W_O | modul průřezu v ohybu | [mm ³] |
| ρ_{Al} | hustota hliníku | [g·cm ³] |
| ρ_{Cu} | hustota mědi | [g·cm ³] |
| σ_o | ohybové napětí | [MPa] |

Zkratky

| Označení | Legenda |
|----------|------------------|
| PVC | polyvinylchlorid |

SEZNAM VÝKRESŮ

| Název výkresu | označení výkresu |
|------------------|--------------------|
| Dusitko | 2024-BP-239163-D01 |
| Dusitko_upravene | 2024-BP-239163-D02 |
| Forma_1 | 2024-BP-239163-F01 |
| Forma_1_sestava | 2024-BP-239163-01 |
| Forma_2 | 2024-BP-239163-F02 |
| Forma_2_sestava | 2024-BP-239163-02 |
| Kusovnik | 2024-BP-239163-K01 |
