

# Tváření výbuchem

Bc. Lukáš Kučera

---

Diplomová práce  
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš KUČERA**  
Osobní číslo: **T10966**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení jakosti**

Téma práce: **Tváření výbuchem**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Vypracujte literární studii
  - Technologie tváření – rozdělení
  - Technologie tváření výbuchem
3. Praktická část
  - Návrh tvářené součásti
  - Návrh tvářecího nástroje
  - Kontrolní pevnostní výpočet
  - Ekonomické zhodnocení
4. Závěr

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle pokynů vedoucího Diplomové práce.**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Zdeněk Dvořák, CSc.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Bc. Lukáš Kučera

Obor: Řízení jakosti

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně, 17. 05. 2012



podpis diplomanta

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## ABSTRAKT

Diplomová práce *Tváření výbuchem* se zabývá podrobným přehledem o obecných technologiích tváření. V práci je pojednáno o všeobecných technologiích tváření materiálu pomocí všech dostupných způsobů, i pomocí speciálních způsobů tváření v dané technologii. Je popsáno složení pryží a její vlastnosti. V práci je navržena konstrukce tvářecího nástroje pro výrobek z odvětví lékařského průmyslu pomocí nekonvenčního způsobu tváření výbuchem. Je proveden kontrolní pevnostní výpočet navrženého nástroje pro výrobek. V závěru je pojednáno o ekonomickém zhodnocení použité technologie.

### **Klíčová slova:**

Nekonvenční tváření, tváření výbuchem, tváření trubek, tváření dílů pro lékařské přístroje.

## ABSTRACT

This thesis deals with the explosion forming a detailed overview of the general technology of forming. The paper discusses the general material forming technology using all available ways and means of special methods of forming in the technology. Described rubber composition and its properties. The paper describes the design of forming tools for the product from the medical industry with an unconventional method of forming blast. The strength calculation of the inspection forms designed for the product. In conclusion, we discuss the economic evaluation of technologies used.

### **Keywords:**

Unconventional forming, explosive forming, tube forming, forming of parts for medical device.

Děkuji vedoucímu své diplomové práce, panu doc. Ing. Zdeňku Dvořákovi, CSc., za odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi poskytoval v průběhu vypracování diplomové práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Na celé diplomové práci jsem pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ</b> .....	<b>12</b>
1.1 KRYSTALICKÁ STAVBA KOVŮ.....	12
1.2 PLASTICKÁ DEFORMACE.....	14
1.3 ROZDĚLENÍ TVÁŘECÍCH PROCESŮ.....	15
1.3.1 Rozdělení tvářecích procesů dle teploty .....	15
1.3.2 Rozdělení tvářecích procesů podle tepelného efektu .....	17
1.3.3 Rozdělení tvářecích procesů podle působení vnějších sil .....	17
<b>2 VOLBA MATERIÁLU A JEHO DĚLENÍ</b> .....	<b>18</b>
2.1 MATERIÁL PRO TVÁŘENÍ .....	18
2.2 DĚLENÍ MATERIÁLU .....	19
2.2.1 Dělení řezáním .....	19
2.2.2 Dělení upichováním .....	19
2.2.3 Dělení lámáním .....	19
2.2.4 Dělení sekáním.....	20
2.2.5 Dělení stříháním .....	20
<b>3 TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ</b> .....	<b>21</b>
3.1 VÁLCOVÁNÍ - PRINCIP A METODY .....	21
3.1.1 Výroba polotovarů válcováním.....	22
3.1.2 Speciální způsoby válcováním.....	24
3.2 KOVÁNÍ – PRINCIP A METODY.....	25
3.2.1 Rozdělení kování.....	25
3.2.2 Speciální způsoby kování.....	27
3.3 PROTLAČOVÁNÍ – PRINCIP A METODY.....	27
3.3.1 Speciální způsoby protlačování.....	28
<b>4 TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ</b> .....	<b>30</b>
4.1 STŘIHÁNÍ - PRINCIP A METODY .....	30
4.1.1 Speciální způsoby stříhání.....	31
4.2 OHÝBÁNÍ – PRINCIP A METODY.....	31
<b>5 ROVNÁNÍ</b> .....	<b>32</b>
<b>6 TAŽENÍ</b> .....	<b>33</b>
6.1 SPECIÁLNÍ ZPŮSOBY TAŽENÍ.....	33
6.1.1 Tváření pryží – metoda Guerin .....	33
6.1.2 Tváření pryží – metoda Marform .....	33
6.1.3 Tváření kapalinou – metoda Wheelon .....	34
6.1.4 Tváření kapalinou – metoda Hydroform.....	34
6.1.5 Hydromechanické tažení .....	34



<b>7</b>	<b>NEKONVENČNÍ METODY</b> .....	<b>35</b>
7.1	ELEKTROHYDRAULICKÉ TVÁŘENÍ .....	35
7.2	ELEKTROMAGNETICKÉ TVÁŘENÍ .....	35
7.3	FREKVENČNÍ TVÁŘENÍ.....	35
7.4	TERMÁLNÍ TVÁŘENÍ .....	35
7.5	TVÁŘENÍ VÝBUchem.....	36
7.5.1	Tváření pomocí střelivin .....	41
7.5.2	Tváření pomocí trhavin .....	42
<b>8</b>	<b>PRYŽE</b> .....	<b>43</b>
8.1	KAUČUK.....	43
8.2	SKLADBA KAUČUKOVÝCH SMĚSÍ.....	43
8.3	ZÁKLADY SKLADBY SMĚSÍ .....	44
8.4	VOLBA ELASTOMERU .....	44
8.5	VULKANIZAČNÍ ČINIDLA .....	44
8.6	URYCHLOVAČE .....	45
8.7	AKTIVÁTORY.....	45
8.8	ZMĚKČOVADLA .....	45
8.9	PLNIVA.....	45
8.10	PIGMENTY .....	46
8.11	VULKANIZACE.....	46
<b>9</b>	<b>SOUHRN A ZHODNOCENÍ STUDIE</b> .....	<b>49</b>
	<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>50</b>
<b>10</b>	<b>CÍL PRÁCE</b> .....	<b>51</b>
<b>11</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ NÁSTROJE</b> .....	<b>52</b>
11.1	NÁVRH VÝROBNÍ TECHNOLOGIE.....	52
11.2	VSTUPNÍ POLOTOVAR .....	53
11.3	TVAR VÝROBKU .....	53
11.4	NÁVRH NÁSTROJE PRO TVÁŘENÍ VÝBUchem.....	54
11.5	KONSTRUKČNÍ NÁVRH VULKANIZAČNÍ FORMY PRO PRYŽOVOU VLOŽKU.....	65
<b>12</b>	<b>KONTROLNÍ PEVNOSTNÍ VÝPOČET</b> .....	<b>72</b>
12.1	PEVNOSTNÍ VÝPOČET SVĚRNÉ SÍLY NÁSTROJE.....	72
12.2	PEVNOSTNÍ KONTROLA ŠROUBŮ .....	73
	<b>EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ, PŘÍNOSY</b> .....	<b>74</b>
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>75</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>77</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>78</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>79</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>80</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>81</b>

## ÚVOD

V současné době je slovo technologie jedno z nejdůležitějších slov, které je slyšet ve všech činnostech, ve všech oblastech, které nás obklopují, které nám pomáhají a usnadňují život. V neposlední řadě jsou technologie i hnacím motorem pokroku a vývoje, prosperity, bohatství [1].

Cílem této práce je pojednání o technologii tváření a o vyzdvižení určitého druhu nekonvenčního tváření a to tváření výbuchem. V práci je popsána technologie tváření obecně, její rozdělení, stručný popis a charakteristika jednotlivých procesů. Dále jsou uvedeny obory použití a výrobky tváření výbuchem, výhody této technologie a její omezení. V závěru teoretické části bude uveden souhrn a zhodnocení studie.

V praktické části je popsán výrobek vytvářen pomocí technologie svařováním ze dvou dílů, která byla nahrazena tvářením výbuchem pomocí střeliviny z jednoho celistvého polotovaru. Pro tuto operaci byl navržen tvářecí nástroj s jeho výkresovou dokumentací. Do soustavy nástroje byl navržen prvek z pryže, který bude přenášet tlakové zatížení od střeliviny na polotovar. Pro vyhotovení pryžového prvku byla navržena vulkanizační forma s výkresovou dokumentací.

Je proveden kontrolní pevnostní výpočet navrženého nástroje a v závěru je pojednáno o ekonomickém zhodnocení výzkumu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ

Tvářením kovů je technologický (výrobní) proces, při kterém dochází k požadované změně tvaru výrobku nebo polotovaru, případně vlastností, v důsledku působení vnějších sil bez odběru třísek. Podstatou tváření je vznik plastických deformací, ke kterým dojde v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu pro daný materiál. Tento děj je provázen fyzikálními změnami a změnami struktury materiálu, což ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu [1]. Technologie tváření představuje jednu z nejstarších metod zpracování kovů a jejich slitin. Počátky využívání tvářecích technologií při výrobě užitkových předmětů spadají až do třetího tisíciletí před naším letopočtem [2].

Již ve středověku se díky vynálezu vodou poháněných pákových bucharů, tzv. hamrů, rozvinulo strojní kování. Po vynalezení parního pohonu se v první polovině 19. století objevily parou poháněné parní buchary. Na počátku 20. století byly parní buchary postupně nahrazovány parohydraulickými, hydraulickými a mechanickými lisami. Například první tažný hydraulický lis o síle 50 MN byl u nás postavený v roce 1909 ve Škodových závodech v Plzni [2].

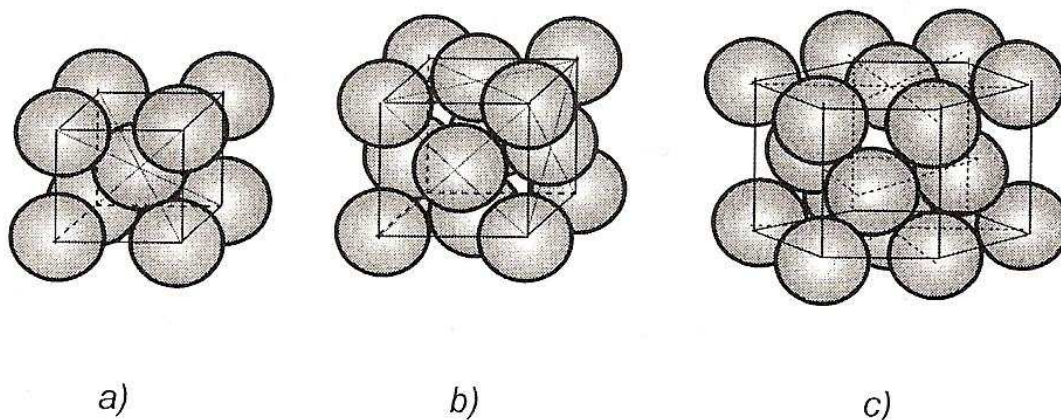
Potřeby ekonomického zpracování moderních konstrukčních materiálů se významným způsobem odráží v dalším rozvoji tvářecích technologií. Mimo klasické technologie se tak stále ve větší míře využívají i technologie umožňující zhotovení přesných, tvarově složitých výlisků a výkovek. Rozvoj technologických metod je však podmíněn hlubokými teoretickými i technologickými znalostmi, jak problematiky tváření, tak i souvisejících oborů [2].

Výhodami tváření jsou vysoká produktivita práce, vysoké využití materiálu a velmi dobrá rozměrová přesnost tvářených výrobků. Nevýhodou je vysoká cena strojů a nástrojů a omezení rozměry konečného výrobku [1].

## 1.1 Krystalická stavba kovů

Kovové materiály vytvářejí v tuhém stavu, v důsledku kovové vazby, krystalickou strukturu. Jednotlivé krystaly jsou tvořeny atomy kovu pravidelně uspořádanými do krystalových mřížek. Kovy a slitiny jsou polykrystalické, jsou tvořeny množstvím krystalů. Při jejich tvorbě, krystalizaci kovu z taveniny, vznikají různě orientované krystaly rozličných tvarů a velikostí. Většina technických kovů krystalizuje v soustavě krychlové

nebo šesterečné. Základní typy krystalických mřížek je prostorově středěná mřížka obr. 1.1a [2], krychlově plošně středěná mřížka obr. 1.1b [2] a šesterečná mřížka, obr. 1.1c [2].



Obr. 1.1 Základní typy krystalových mřížek [2]

Druh krystalové mřížky, v níž daný kov krystalizuje, závisí na vlastnostech atomů, velikosti soudržných sil, které mezi sebou působí, na teplotě a tlaku. Za různých vnějších podmínek, např. v různé oblasti teplot, mohou mít kovy i různou krystalovou mřížku [2].

V reálných kovech není stavba krystalové mřížky dokonalá. Při krystalizaci a rekrystalizaci kovu, stejně jako při jeho technologickém zpracování, vzniká množství krystalových poruch. Podle svého geometrického tvaru se mřížkové vady dělí na **bodové**, **čárkové**, **plošné** a **prostorové** [2].

Existují tři základní druhy **bodových vad** mřížky a to neobsazení uzlového bodu mřížky – **vakace**, atom uložený v meziuzlové poloze – **intersticie**, záměna původního atomu mřížky jiným – **substituce**.

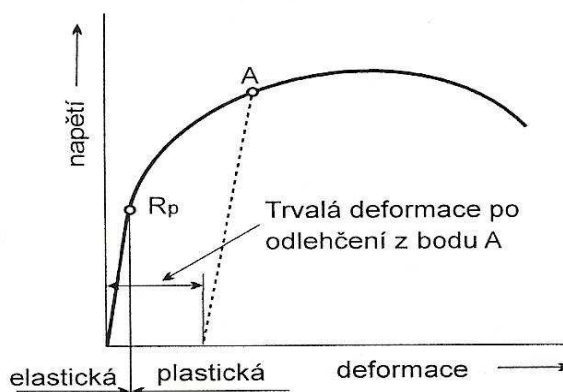
Vznik **čárkových vad** si lze představit částečným posunutím (dislokováním) jedné části krystalu proti druhé. Tyto vady se proto nazývají **dislokace** a rozlišujeme dislokace hranolové, šroubové a smíšené.

**Plošné vady** – Při pravidelném uspořádání krystalových rovin atomů leží atomy jedné roviny vždy v prohlubních mezi atomy rovnoběžné roviny sousední. Pokud je tento sled rovin narušen, vzniká mezi takovými rovinami pás vrstvené chyby. Vrstvené chyby jsou tedy odchylky od pravidelného střídání vrstev v daném typu mřížky.

**Prostorové poruchy** zahrnují objekty krystalické struktury s mřížkou periodickou, která je porušena obvykle chemickými vlivy (shluky atomů příměsí apod.), ale nedošlo ještě k vytvoření nové fáze a tím i hranic zrn. Ostatní prostorové vady mají již charakter porušení celistvosti materiálu (dutiny, trhliny) [2].

## 1.2 Plastická deformace

Působením vnějších sil na kov dochází k jeho deformaci. V první fázi je deformace vratná – pružná (elastická), ta se ve druhé (při překročení meze kluzu  $R_p$ ) mění v trvalou – plastickou deformaci, což lze dokumentovat například na diagramu získaném ze zkoušky tahem, obr. 1.2 [2].



Obr. 1.2 Diagram z tahové zkoušky nízkouhlíkové oceli [2]

Při pružné deformaci se atomy v uzlových polohách krystalické mřížky, vlivem působícího napětí, nepatrně vychýlí ze své rovnovážné polohy. Tento posun nepřesahuje cca 20% meziatomové vzdálenosti. Po odlehčení pružně deformovaného kovu vrátí soudržné vnitřní meziatomové síly atomy do původních rovnovážných poloh. Velikost pružné deformace je úměrná působícímu napětí a u krystalických materiálů je tato úměrnost lineární a vyjádříme ji ve formě Hookova zákona [2]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.1)$$

Kde:  $\sigma$  – napětí [MPa],

$E$  – modul pružnosti v tahu [MPa],

$\varepsilon$  – deformace [-].

Překročí li však napětí určitou hodnotu (mez kluzu), vzniká u kovových materiálů plastická deformace, která po odlehčení zůstává zachována, viz na obr. 1.2 odlehčení po deformaci do bodu A. Tato schopnost trvale se deformovat je využívána při *tváření* – zformování materiálu do požadovaného tvaru. Při plastické deformaci dochází k trvalému posunu atomů, z jejich rovnovážných poloh, který zůstává zachován i po skončení účinku působení vnějších deformačních sil. Trvalý posun atomů nastává až po překročení hodnoty takzvaného kritického smykového napětí, a to pouze v některých krystalografických rovinách a směrech. Jde o roviny a směry v nichž je jeho hodnota největší a kde se pohyb atomů setkává s nejmenším množstvím překážek [2].

Plastické deformace se tedy uskutečňuje pohybem dislokací v činných krystalografických rovinách a jejím základním mechanismem je transkrystalický skluz (kluz). Plastická deformace tak neproběhne současně přesunutím všech atomů v činné (kluzné) rovině, což by vyžadovalo vysoké hodnoty smykových napětí, ale postupným pohybem dislokací. Vzhledem k tomu, že struktura reálných kovů obsahuje velké množství mřížkových poruch, zejména dislokací, jejichž hustota bývá  $10^7$  až  $10^8$  na  $\text{cm}^2$ , je hustota kritického smykového napětí většiny kovů relativně nízká.

### 1.3 Rozdělení tvářecích procesů

Tvářecí procesy se rozdělují dle teploty, za které proces probíhá, kam se absorbuje vzniklé teplo během operace a dle působení vnějších sil.

#### 1.3.1 Rozdělení tvářecích procesů dle teploty

Při tváření za studena dochází v přetvárném objemu k nerovnoměrnému rozložení deformací důsledkem různé orientace kluzových rovin v jednotlivých zrnech. Dochází ke vzniku pružně plastické deformace. Po odlehčení zůstávají ve tvářeném materiálu zbytková napětí. Při ohřevu roste amplituda tepelných kmitů atomů. Tímto je ulehčen jejich návrat do rovnovážných poloh. Dochází k vyrovnávání pružných deformací a po odlehčení od vnějšího zatížení ke snížení vlastních napětí v materiálu. Ohřevem materiálu na teplotu  $0,25 T_{TAV} - 0,30 T_{TAV}$  nastane tak zvaný zotavovací proces. Zotavení způsobuje snížení přetvárného odporu a částečné zvýšení plasticity ve tvářecím procesu. Intenzita zpevňovacích pochodů je nižší. Proces zotavení úzce souvisí s deformační rychlostí. Zvýšení deformační rychlosti při dané teplotě může podstatně snížit efekt zotavení. Proces zotavení zvyšuje odolnost kovu tvářeného za studena vůči korozi a snižuje výskyt samovolného praskání. U nízkouhlíkatých ocelí může docházet při teplotách zotavení ke stárnutí materiálu. Daný proces je příčinou růstu přetvárného odporu a vede ke snížení plasticity materiálu.

Při změně teploty se mění deformační odpor materiálu (oceli) proti tváření. Se zvyšující se teplotou se zlepšují plastické vlastnosti kovů a jejich slitin [1]. Podle velikosti teploty rozdělujeme tvářecí technologie na:

➤ **tváření za studena** (deformační procesy probíhají pod teplotou rekrystalizace, řídicím faktorem je zpevnění)

➤ **tváření s částečným** zpevněním (tvářecí procesy probíhají za poloohřevu nad teplotu zotavení, ale pod teplotu rekrystalizace)

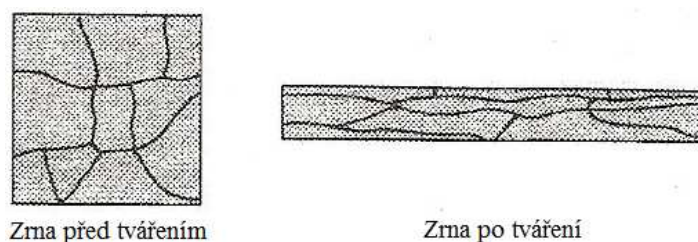
➤ **tváření za tepla** (tvářecí procesy probíhají nad teplotou rekrystalizace, řídicím faktorem je opevnění)

➤ **tváření s neúplným** opevněním (neúplný ohřev nad teplotu rekrystalizace, ale nepřevyšující spodní kovací teplotu) [3].

Rozdělení tvářecích procesů podle teploty je vlastně rozdělení podle vztahu teploty tvářeného materiálu k teplotě rekrystalizace (přibližně 0,4 teploty tání kovu  $^{\circ}\text{C}$ ).

Rekrystalizační teplota je teplota, při které dochází k regeneraci deformovaných zrn vzniklých tváření za studena beze změny krystalové mřížky. Potom tedy rozdělení tvářecích technologií podle teploty je na:

**Tváření za studena** (tváření pod rekrystalizační teplotou, kdy teplota tváření je pod hodnotou 30% teploty tání tvářeného materiálu), kdy dochází ke zpevňování materiálu, které se zachová k nárůstu odporu proti dalšímu tváření (nakonec dojde k vyčerpání plastičnosti materiálu), zrna se deformují ve směru tváření, vytváří se struktura, viz obr. 1.3 [1], dochází k anizotropii mechanických vlastností. Zpevněním se zvyšují mechanické hodnoty (mez pevnosti a mez kulu) a klesá tažnost. Zahřátím kovu je možné obnovit deformační schopnost, kov získává opět schopnost být plasticky tvářen. Výhodou je vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch (nenastává okujení) a zlepšování vlastností zpevněním. Nevýhodou je nutnost používat velké tvářecí síly, nerovnoměrné zpevňování a omezená tvárnost materiálu [1].



Obr. 1.3 Změna tvaru zrn v důsledku tváření [1]

**Tváření za tepla** probíhá nad rekrystalizační teplotou, kdy rychlost rekrystalizace je tak vysoká, že zpevnění způsobené tváření zmizí již v průběhu tváření anebo bezprostředně po něm. Teplota tváření je nad hodnotou 70% teploty tání daného tvářeného materiálu. Materiál se nezpevňuje a k tváření stačí síly až desetkrát menší, než u tváření za studena. Může a nemusí vznikat struktura, ale povrch je nekvalitní vlivem okujení, navíc hrubné zrno, což je problematické u dalších technologických operací z hlediska kvality.



Proces je poměrně zdlouhavý a nákladný, na druhé straně však dochází k odstranění trhlin. Dalším vlivem tvářní za tepla je vznik vláknité struktury z hrubé dendritické struktury ingotu, která kopíruje tvar výkovku. Vláknotou strukturu je nemožné změnit tepelným zpracováním, ani tvářením. Vláknotá struktura ovlivňuje mechanické vlastnosti a anizotropii. Vzniká v důsledku nečistot, obsažených v povrchových vrstvách krystalů.

**Tváření za poloohřevu** představuje kompromis mezi tvářením za studena a za tepla. Důvodem je zlepšení přetvárných vlastností oproti tvářením za studena, snížení přetvárných odporů, dosažení zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností, přesnosti a jakosti povrchu. Horní teploty jsou omezeny oxidací povrchu [1].

### 1.3.2 Rozdělení tvářecích procesů podle tepelného efektu

Část energie, vynaložené na tvářením, se mění na teplo a množství tepla závisí na rychlosti deformace a odporu materiálu proti deformaci. Podle toho, kde se odvede vzniklé teplo, se tvářecí procesy dělí na [1]:

- **Izometrické tvářením** je tvářením, kdy veškeré vyvinuté teplo je odvedeno do okolí a teplota tvářeného kovu se nemění. Deformace je dostatečně pomalá.
- **Adiabatické tvářením** je proces tvářením, při kterém veškeré teplo zůstane v materiálu a dojde ke zvýšení teploty kovu. Deformace je extrémně vysoká.
- **Polytropické tvářením** je způsob tvářením, u kterého se část tepla odvede do okolí a část tepla zůstane v tvářeném materiálu, což je nejčastější případ.

### 1.3.3 Rozdělení tvářecích procesů podle působení vnějších sil

Z tohoto hlediska se dělí tvářením kovů na [1]:

- **Tváření objemové**, při kterém deformace nastává ve směru všech tří os souřadného systému a patří sem válcování, kování, protlačování, tažení drátů.
- **Tváření plošné**, při kterém převládají deformace ve dvou směrech. Patří sem tažení, ohýbání, stříhání apod.

## 2 VOLBA MATERIÁLU A JEHO DĚLENÍ

Volba materiálu určeného ke tváření musí mimo pevnostní a chemické odolnosti vyhovovat zvolené technologii jeho zpracování.

### 2.1 Materiál pro tváření

Volba vhodného materiálu pro tváření je závislá na volbě tvářecí technologie, která ovlivňuje nejenom produktivitu výroby, ale i kvalitu a přesnost výroby. Nejčastějším materiálem pro tváření je ocel, neželezné kovy a v neposlední době i kompozitní materiály. O každém materiálu je nutné znát jeho chemické složení, mechanické vlastnosti, teplotu a způsob ohřevu. Tvářitelnost se kvalifikuje ve čtyřech stupních jako zaručená, velmi dobrá, dobrá a omezená tvářitelnost. Kontrola materiálu se provádí vždy na vstupu do výrobního procesu a obvykle se kontroluje množství a rozměry, chemické složení (důležité pro tepelné zpracování), mechanické vlastnosti (kontrolují se proto, aby se zjistili vlastnosti materiálu před tvářením, neboť hlavně tvářením za studena dojde k výrazné změně mechanických hodnot) a technologické vlastnosti (posouzení vhodnosti a vlastnosti daného materiálu pro zvolenou technologii – technologické zkoušky tvářitelnosti).

Jako *polotovary* pro tvářecí technologie se používají buď ingoty, vývalky nebo plechy. *Ingoty* se odlévají v rozsahu hmotnosti od 0,5 tun do 300 tun. Ve strojírenských podnicích se zpracovávají ingoty volným kováním o hmotnosti od 10 do 15 tun. Těžší se zpracovávají přímo v hutích. *Vývalky* jsou konečné hutnické výrobky z těžkých ingotů, které jsou válcované za tepla. Používají se jako polotovary pro volné a zápusťkové kování, protlačování. Obvykle se používají v přírodním stavu, neboť tepelně zpracovaný materiál v důsledku tváření za tepla stejně změní svoji strukturu. Tepelně zpracované vývalky se používají hlavně u plošných technologií tváření (tažení, stříhání, ohýbání). Zvláštní místo zaujímají hlubokotažné plechy. Ocelové plechy se dodávají buď – v *tabulích*, nebo ve *svitcích*. Do tloušťky 4 mm jsou plechy označovány jako tenké, nad touto hodnotou jako plechy tlusté [1].

## 2.2 Dělení materiálu

V technologii tváření se používají různé polotovary, například tyčový materiál, svitky, tabule a jiné, které se dělí na přesnou hmotnost, respektive na požadovaný rozměr. Dělení materiálu má vliv i na kvalitu výrobku a to kvalitou plochy v místě dělení. Z hlediska dělení materiálu můžeme používat následující způsoby: *řezání, upichování, lámání, sekání, stříhání* [1].

### 2.2.1 Dělení řezáním

Materiál dělit řezáním můžeme na okružích, rámových nebo pásových pilách. Při řezání se část materiálu ztrácí ve formě třísek (nejde o tváření) a hmotnost odpadu závisí na šířce pily. Řezat materiál lze jen do určité tvrdosti, jinak se musí předem vyžít. Řezáním lze zajistit hladký řez a přesnou hmotnost řezaného polotovaru a kolmost řezu, což je u některých technologiích dělení problematické [1].

### 2.2.2 Dělení upichováním

Používá se poměrně zřídka, neboť je to drahý způsob dělení na upichovacích automatech nebo na univerzálních soustruzích. Ztráty materiálu jsou poměrně značné, na druhé straně lze získat velmi hladké povrchy. Používá se pro přesné rozměry polotovarů (například pro protlačování), nedochází ke stlačení [1].

### 2.2.3 Dělení lámáním

K lámání se používají speciální lámací stroje. Před lámáním se polotovar nahřívá kyslíkoacetylenovým plamenem v místě, kde dojde k ulomení. Tím se vytvoří vrub a zmenší se plocha průřezu. Lámáním nelze dělit měkké materiály, které se pouze ohnou. Mez pevnosti musí být vyšší, jak 600 MPa. Nevýhodou je i nízká kvalita lomové plochy, možnost vzniku trhlin a jejich šíření do materiálu. Používá se hlavně pro přípravu polotovarů pro tváření za tepla [1].

#### 2.2.4 Dělení sekáním

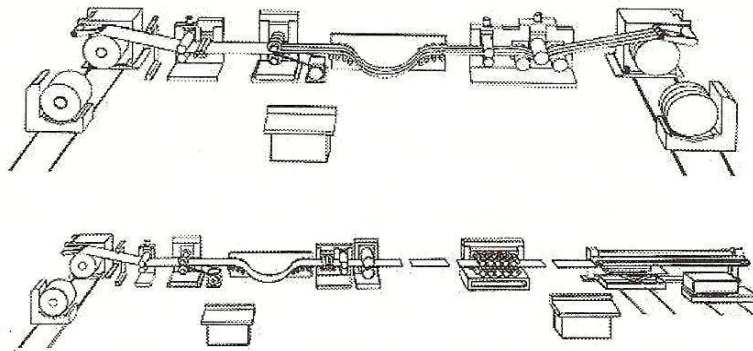
Používá se velmi málo a to hlavně u volného kování. Nástrojem je sekáč, který můžeme používat buď ručně, nebo pomocí stroje, například bucharu. Nevýhodou je nízká produktivita, nerovná plocha se záseky, vysoká fyzická námaha. Nejčastěji se používá jako doplňková operace při odsekávání přebytečného materiálu na konci výkovku.

#### 2.2.5 Dělení stříháním

Stříhání je nejrozšířenější operace při dělení materiálu, ale i technologie tváření. Používá se na:

- **Přípravu polotovarů**, například stříhání tabulí plechu, dělení svitků, stříhání profilů, stříhání vývalků a jiné.
- **Vystřihování součástek z plechů** pro přímé použití nebo jako polotovarů pro další technologie, jako ohýbání, tažení, protlačování a podobně.
- **Na dokončovací nebo pomocné operace.**

Dělit materiál stříháním můžeme za tepla i za studena. Za studena se stříhají pouze měkké oceli do pevnosti zhruba 400 MPa a nebo plechy. Tvrdé materiály se ohřívají na teplotu asi 700 °C. Dělit materiál můžeme rovnoběžnými noži, skloněnými noži anebo kotoučovými noži, respektive noži na profilový materiál. Dělit materiál můžeme jak v podélném směru, tak i v příčném směru, viz obr. 2.1 [1].



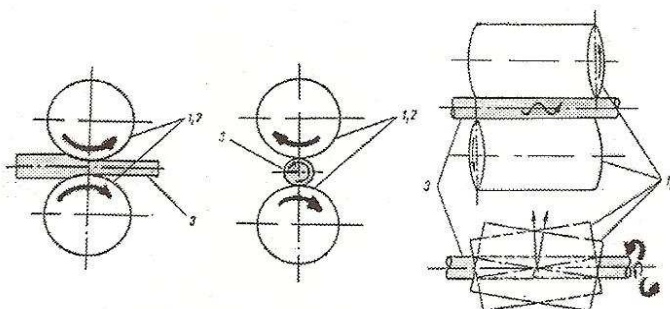
Obr. 2.1 Schéma linek na podélné (nahore) a příčné dělení stříháním (dole) [1]

### 3 TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ

Technologie objemového tváření se týká tváření, při němž je trojosá napjatost. Jako polotovary se používá přístřih tyče, sochoru a podobně. Dále uvedené technologie mohou probíhat při libovolných teplotách, tedy za studena, za tepla, za poloohřevu [1].

#### 3.1 Válcování - princip a metody

Ztuhlé ocelové ingoty o hmotnosti kolem 10 tun se prohřívají v hlubinných pecích na teplotu tváření kolem 1100 °C a válcují se na předvalky. Z těch se pak vyrábějí válcováním konečné výrobky – vývalky (tyče, kolejnice, plechy, pásy, trubky a podobně). Válcování je kontinuální proces, při kterém se tvářený materiál deformuje mezi otáčejícími se pracovními válci za podmínek převažujícího všestranného tlaku. Válcovaný materiál se mezi válci deformuje, výška se snižuje, materiál se prodlužuje a mění se i rychlost, kterou válcovaný materiál z válcovací stolice vystupuje. Mezera mezi pracovními válci je menší, než vstupní rozměr materiálu. Válcování se provádí hlavně za tepla, ale i za studena. Výsledkem procesu je vývalek. Podle směru, kterým válcovaný materiál prochází pracovními válci, podle uložení os válců vzhledem k válcovanému materiálu a podle průběhu deformace válcování dělíme na *podélné, příčné a kosé*, viz obr. 3.1 [1].



Obr. 3.1 Princip podélného (vlevo), příčného (uprostřed) a kosého (vpravo) válcování (1,2 – válce, 3 – materiál) [1]

U podélného válcování se materiál tváří ve směru podélném a tímto způsobem se vyrábějí tyče, kolejnice, to znamená dlouhé polotovary. Přímým válcováním se redukuje radiální průřez a tento způsob se používá například pro osazené hřídele. U kosého válcování jsou mimoběžné osy a takto se vyrábějí například trubky [1].

Při podélném válcování neprobíhá plastická deformace současně v celém objemu, ale pouze v relativně malé části. Největší rozměrová změna, deformace, je ve směru tloušťky a menší rozměrové změny jsou ve směru délky a šířky při zachování platnosti zákona o zachování objemu. Napětový stav závisí hlavně na tření a deformace s sebou nese i změnu rychlostí materiálu vývalku na výstupu. Proces válcování je umožněn jen v důsledku *tření* mezi pracovními válci a válcovaným materiálem. Koeficient tření  $f$  je závislý na kvalitě povrchu válců, na stykových plochách a také na měřeném tlaku, tedy na charakteru prokluzu. Součinitel tření a měrný tlak způsobují vznik dvou sil v místě válcování a to normálové a tečné síly. Limitní podmínkou válcování, která vychází ze silového působení normálových a třecích sil v místě válcování je, že součinitel tření musí být vyšší (nebo minimálně roven) než polovina úhlu záběru tedy [1]:

$$f > tg \frac{\alpha_0}{2} \quad (3.1)$$

Koeficient tření se během válcování mění a to hlavně mezi začátkem válcování a mezi ustáleným válcováním.

*Úběr* (změna z původní tloušťky před válcováním na tloušťku po válcování) a tím i produktivita procesu může být tím větší, čím budou válce menšího průměru a čím budou drsnější. Součinitel tření se snižuje se stoupající tvrdostí povrchu. Válce malého průměru však lze používat s ohledem na tuhost pouze při menších šířkách válcovaného materiálu a drsný povrch válců není vhodný pro dokončovací operace, protože by se tím porušil povrch vývalku. Z této úvahy vyplývá nutnost válcování menšími úběry, ve více válcovacích operacích. S výhodou se volí počáteční operace s velkým úběrem při méně kvalitním povrchu vývalku a koncové operace s malým úběrem.

### 3.1.1 Výroba polotovarů válcováním

Válcováním lze vyrábět velké množství polotovarů rozmanitých tvarů. Mezi základní patří profily, plechy, dráty, trubky.

*Dráty* se válcují na speciálních válcovacích tratích za tepla, které jsou kontinuální, nepřetržitě.

*Plechy* se válcují ve válcovacích stolicích s hladkými válci z plochých převalků. Nejprve se válcuje napříč, aby se dosáhlo potřebné šířky plechu, poté se otočí o 90° a válcuje se podélně. Tím se dosáhne stejnoměrné tloušťky a rovnoměrnějších vlastností materiálu v podélném i příčném směru válcování. Vyrábějí se jak plechy tlusté, tak i tenké.

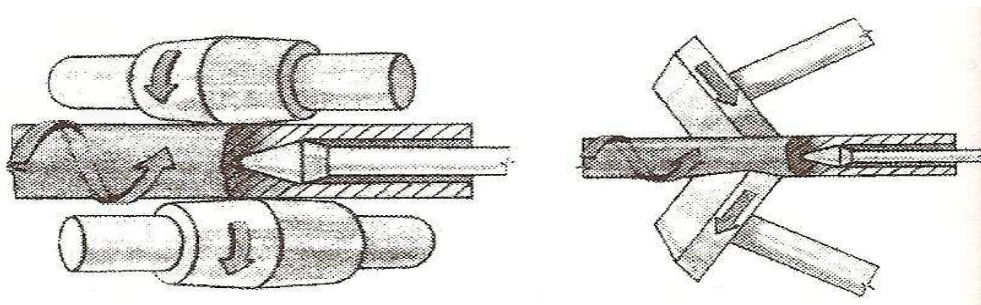
Hranicí jsou 4 mm. Plechy mohou být pocínované, pozinkované, poolovené nebo lakované. Válcováním za studena se používá pro výrobu plechů s hladkým povrchem a velkou přesností, i když výchozím polotovarem jsou pásy válcované za tepla. Hlubokotažné plechy jsou plechy s dobrými mechanickými vlastnostmi, například převálcované za studena.

**Profily** různých tvarů a rozměrů se válcují na profilových válcovacích stolicích. Válcovaný materiál prochází postupně kalibry, které se zmenšují, aniž se válce k sobě přibližují. Poslední kalibr má tvar požadovaného profilu. Válcují se je profily kruhové, čtyřhranné, šestihranné a jiné, tak tyče různých profilů jako **I**, **U**, **L**, kolejnice a tak dále.

**Trubky** (bezešvé) se také vyrábějí převážně válcováním. Rozměry trubek jsou dány jejich průměrem a tloušťkou stěny. Podle použité výrobní technologie rozdělujeme trubky z hlediska válcování na válcované za tepla a za studena, redukované za tepla a za studena a podle provedení na hladké, závitové, s tvarovými konci a jiné. Jejich výrobu můžeme rozdělit zhruba do dvou základních operací [1]:

- Výroba dutých polotovarů s velkou tloušťkou stěny pomocí kosého nebo příčného válcování na dvou nebo třech válcích – děrování a válcování polotovarů.
- Zpracování těchto polotovarů na trubky poutnickým nebo klasickým způsobem válcování děrovaného polotovaru (redukce průměru, prodloužení), kalibrace rozměrů.

Nejčastěji se děruje polotovar kosým válcováním (základ Mannesmannova a Stiefelova způsobu výroby), při kterém dochází v důsledku jednosměrného stlačení materiálu (vznik tahových napětí) k rozrušení materiálu ve středu polotovaru a k posunu částic materiálu ze středu průřezu ven směrem k obvodu, který se zvětšuje a tím k tvorbě vnitřních trhlin, tedy k děrování, viz obr. 3.2 [1]. Díra má nepravidelný tvar a proto se kalibruje trnem kvůli hladkému povrchu.



Obr. 3.2 Princip kosého válcování trubek – Mannesmannův způsob (vlevo), Stiefelův způsob (vpravo) [1]

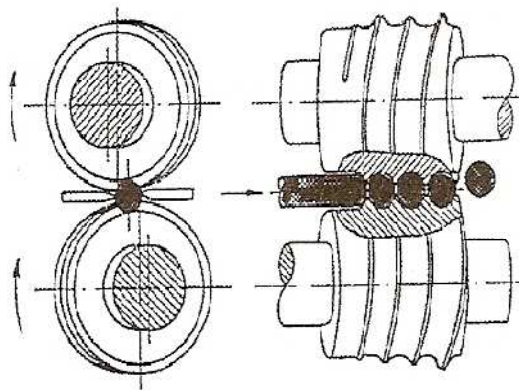
K dalšímu druhu patří válcování na *tratiích s tříválncovou stolicí* (Asselův způsob), kdy kuželové válce jsou vzájemně mimoběžné a šikmo umístěné pod úhlem  $10^\circ$  až  $15^\circ$ , umožňuje měnit stupeň příčné deformace a to změnou úhlu sklonu válců.

*Tratě s příčnými válci*, kotouči – Diescherův způsob válcování trubek se používají pro trubky menších rozměrů s malými tloušťkami stěn s velmi dobrou jakostí povrchu.

### 3.1.2 Speciální způsoby válcování

Válcováním lze vyrábět též speciální strojní a hutní výrobky. Mezi speciální způsoby patří *příčné klínové válcování* (Holubova metoda). Používá se pro výrobu předkovek, vývalků, ale i pro výrobu polotovarů rotačních tvarů v konečné kvalitě. Polotovar je, anebo může být, indukčně ohřát a posunut do tvářecího stroje. Tímto způsobem se vyrábějí například osy šlapek jízdních kol.

Mezi další patří *válcování kuličkových polotovarů*. Ukázka válcování kuličkových předvalků kosým válcováním válci se šroubovicovým profilem z tyče je na obr. 3.3 [1]. Kuličkové předvalky jsou určeny pro další výrobu kuliček pro kuličková ložiska. Vysoká přesnost kuliček je dána tvářením za studena, dochází zde ke zpevnění materiálu a k jeho petchování. V poslední profilové části válců dojde k ustřížení kuličky od zbytku tyče.



Obr. 3.3 Válcování kuličkových polotovarů [1]

Zvláštním případem válcování je výroba tvářených závitů. Závitů lze válcovat jedním, dvěma nebo třemi kotouči opatřenými negativem reliéfu požadovaného závitů. Nástroj se při odvalování postupně zatlačuje do polotovaru, přičemž postupuje i osově podle stoupání závitů. Zatlačování je vyvozeno hydraulicky. Tvářené závitů mají vyšší únosnost, nežli závitů vyráběné obráběním, nedochází k porušení vláknité textury a při tvářením studena dochází k zlepšení mechanických vlastností v důsledku zpevnování [1].



## 3.2 Kování – princip a metody

Kováním je objemové tváření za tepla, prováděné úderem nebo klidně působící silou. Kování má bohatou historii – ruční kování pomocí kladiva a kovadliny zná lidstvo několik tisíců let. Jedná se o přetržitý způsob a výkovek má požadovaný tvar, příznivou makrostrukturu, výhodnou mikrostrukturu a zvýšené mechanické a fyzikální vlastnosti. Kováním lze zpracovávat téměř všechny kovy. Strojní kování zproduktivňuje výrobu malých a středně velkých výkovků a umožňuje zpracování těžkých odlitků. Hlavní důraz při kování se klade na nejmenší spotřebu materiálu, optimální přesnost výkovku, vysokou jakost tvářeného kovu, příznivý průběh vláken a na ekonomii provozu. Kování nejen umožňuje vyrábět tvary požadovaného rozměru, ale zároveň i zlepšovat původní mechanické vlastnosti a strukturu – kování má velký význam nejenom pro tvarování výrobku, ale i pro zlepšení mechanických vlastností [1].

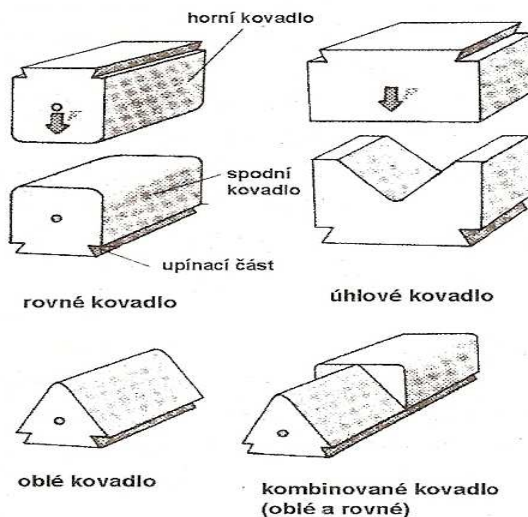
### 3.2.1 Rozdělení kování

Kování dělíme na *volné*, to je na kovadlině nebo pomocí univerzálních kovacíh podložek a *zápustkové*, to je ve tvarových dutinách (zápustkách). Při volném kování může materiál tvářený údery nebo tlakem téci volně hlavně ve směru kolmém k působení síly. Při zápustkovém kování je materiál vtláčován údery nebo tlakem do kovové, většinou dvoudílné zápustky.

K *volnému kování* se používá různých tvářecích strojů, zejména bucharů a lisů. Buchary působí na materiál údery (rázy) beranu, ale prokovou jej jen do určité hloubky. Proto buchar působí více rázy a díky tomu je možné dosáhnout vyššího stupně prokování. Při úderech beranu odpadají z materiálu okuje, a proto je povrch výkovku čistý. Lisy působí na materiál klidným tlakem a prokovou materiál v celém průřezu [1].

Problematika kování je vázána na vliv mezi tvářecími částmi nástroje a materiálem, které způsobuje soudečkovitost výkovku nebo vyboulení u dlouhých těles a dále rozdílné stupně prokování v jednotlivých oblastech výkovku (je nutné otáčení) – mluvíme o kovářském kříži. Volně kované výkovky se navrhují vždy v jednodušším tvaru, než jaký má mít výkovek. Tvarovanému zjednodušení se říká technologický přídavek. Vedle technologických přídavků má výkovek ještě přídavky na obrábění a to v náležitých tolerancích.

K výrobě pomocí volného kování se používá jednoduchých kovářských nástrojů, přípravků a strojů. Nejpoužívanější nástroje jsou kovádla (horní a spodní). Kovadla jsou jednoduchých geometrických tvarů, jako například kovádla rovinná, válcová, klínová a podobně, viz obr. 3.4 [1]. Rybinové části kovádel slouží k upevnění na bucharu nebo lisu, díry v čelní stěně slouží k manipulaci s nástrojem. Pracovní plochy kovádel jsou kalena.



Obr. 3.4 Tvary kovádel [1]

Mezi základní práce a principy volného kování patří **pěchování**. Pěchování je nejjednodušší tvářecí přetvárný proces, při kterém dochází k plastické deformaci materiálu mezi dvěma plochými nebo tvarovými čelistmi, respektive v dutině. Pro pěchování je nutné prohřát celý materiál rovnoměrně a zajistit rovnoběžnost čelních ploch, omezit štíhlost polotovaru (nebezpečí ohybu) a zajištění kolmosti k ose stroje.

Další technologií volného kování je **prodlužování** (kování do délky, vytahování). Je to nejpoužívanější operace při volném kování. Podstatou je provedení většího množství pěchovacích operací vedle sebe, čímž dochází k prodlužování a zároveň ke zmenšení plochy příčného průřezu.

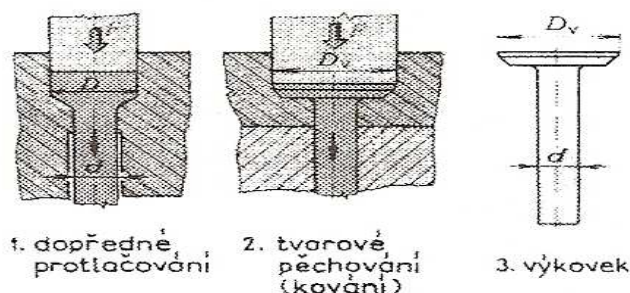
**Zápustkové kování** slouží k výrobě velkého počtu tvarově stejných součástí z ocelí nebo jiných tvárných slitin. Zápustka je většinou dvoudílný nástroj. Hlavní předností zápustkového kování je vysoká výkonnost a snadná obsluha. Ohřátý materiál se tváří v dutině zápustky, jejíž tvar je shodný s tvarem výkovku. Proti volnému kování dosahuje přesnějšího tvaru výrobku [1].

### 3.2.2 Speciální způsoby kování

Mezi speciální způsoby kování patří *přesné kování*. Výkovky s minimálními přídávky na obrábění i úkosy se zhotovují v uzavřených zápustkách. Pro úspěšné kování je třeba přesně dodržovat objem a středění vloženého materiálu do zápustky. Nejvhodnější jsou rotační tvary.

Kování na *vodorovných kovacích strojích* umožňuje částečnou nebo i úplnou automatizaci výrobního procesu. Jedná se v podstatě o horizontální klikové lisy vhodné hlavně pro pēchování z tyčového materiálu a práci s uzavřenými zápustkami.

Dalším technologickým procesem je kování – *protlačování za tepla*, kdy tvářený materiál je v uzavřené zápustce stlačován průtláčnickem viz obr. 3.5 [1]. Je to vlastně kombinace protlačování a kování. Tento způsob se používá pro slitiny hliníku a mědi, ale i pro ocel. Zvyšuje se tvárnost kovu, protože je materiál vystaven prostorové tlakové napjatosti [1].



Obr. 3.5 Kování protlačováním za tepla [1]

Zvláštním případem kování je tzv. *kování za rotace*. Dochází při něm k redukci průřezu na menší průměr nebo k vykování válcové části na hranatém profilu. Na rozdíl od ostatních procesů kování se provádí za studena.

Posledním speciálním způsobem kování je *kování vícenásobné*. Materiál je v uzavřené zápustce podroben tlak lisovníku, kovadel, z několika stran. Výkovky jsou přesné s minimálními přídávky na obrábění [1].

### 3.3 Protlačování – princip a metody

Principem protlačování je deformace materiálu v důsledku působících sil do předem stanoveného směru s konečnými výhodnými mechanickými a rozměrovými vlastnostmi konečného výrobku. Protlačování je jedním z procesů, které přispěly

k výraznému snížení vlastních nákladů ve výrobě, tedy i k racionalizaci výroby. Přesnost průtlačků je obvykle velmi vysoká, takže není nutno před montáží výrobky rozměrově upravovat. Jakost a výchozí stav materiálu má výrazný vliv na technologii a proces protlačování. Vzhledem k velikosti přetvárných odporů jsou pro protlačování vhodné materiály s větší tažností. Před vlastním protlačováním je nutná úprava materiálu rovnáním a dělením na kaloty včetně tepelného zpracování, následuje povrchová úprava [1].

Při *dopředném (přímém) protlačování* se materiál pohybuje ve stejném směru jako průtlačník. Výchozím polotovarem bývá kalota, získaná například lisováním plechu nebo upichováním z tyčí. Používá se při tváření čepů, šroubů, pouzder apod., tedy u výrobků, u kterých není konstantní průřez.

Při *zpětném protlačování* se pohybuje materiál v opačném směru a používá se k výrobě dutých průtlačků i se žebry, kdy tloušťka stěny je v porovnání s průměrem velmi malá anebo naopak.

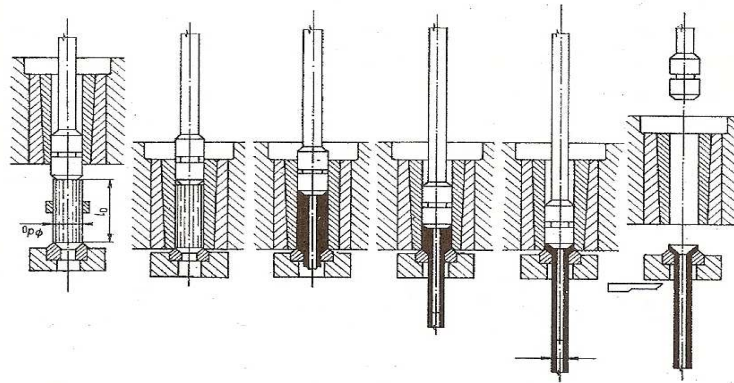
Dalším principem je *protlačování kombinované (sdružené)*. Vyrábí se tím profilové výrobky, které jsou velmi namáhavé a které nemusí být válcového tvaru. Při kombinovaném protlačování se materiál pohybuje v obou směrech, kdy musí platit, že stupeň deformace v dolní části na dně průtlačnice musí být menší, než v horní části, kterou tváří průtlačník, jinak materiál do tvarovaného dna nezateče [1].

### 3.3.1 Speciální způsoby protlačování

Speciální metodou protlačování je *ražení* (vtlačování), *protlačování trubek* a *hydrostatické protlačování* kovů.

*Ražením* se vyrábějí funkční tvary dutin nástrojů v důsledku zvýšení životnosti.

U technologie protlačování trubek jsou výchozím polotovarem válcované špalky potřebné délky. Následuje většinou ohřev a vlastní děrování a protlačování dopředným způsobem viz obr. 3.6 [1]. Po skončení procesu zůstává v matici zbytek, technologický odpad, který se musí odstranit. Stupeň deformace je velký, kdy součinitel prodloužení je 8 až 25 násobný.



Obr. 3.6 Technologie výroby trubek protlačováním [1]

Další speciální technologií je *hydrostatické protlačování*, kdy je polotovar obklopen kapalinou o vysokém tlaku. Tím se vytváří všestranné napětí a tvárnost materiálu se zvýší. Technologické možnosti hydrostatického protlačování jsou již dnes takové, že se může protlačovat již bez fosfatizační vrstvy nebo například výrobky plátované mědi [1].

## 4 TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ

Technologie plošného tváření je tváření, při němž je dvouosá napjatost, provádí se jak za studena, tak i za tepla [1].

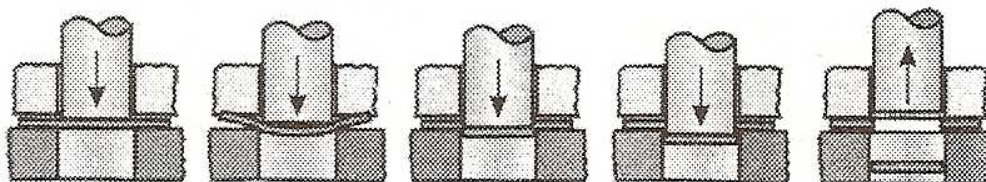
### 4.1 Stříhání - princip a metody

Stříhání je nejrozšířenější operací tváření. Používá se jednak na přípravu polotovarů (stříhání tabulí nebo svitků plechů, stříhání profilů, vývalků), jednak na vystřihování součástek z plechu buď pro konečné použití, nebo pro výrobky na další technologie (ohýbání, protlačování, tažení) a na dokončovací operace, které se nazývají podle způsobu odstraňování materiálu. Patří sem děrování, vystřihování, ostřihování, přistřihování a jiné.

Stříhání se může podle teploty procesu dělit:

- *Na stříhání za studena* – jen pro měkčí oceli a pro plechy.
- *Na stříhání za tepla* – pro tvrdší a tužší materiály při ohřevu asi na teplotu 700 °C.

Stříháním je oddělování části materiálu působením protilehlých řezných hran způsobujících řezné rovinné smykové napětí. Princip stříhání je ukázán na obr. 4.1 [1] a stříhání probíhá ve třech fázích.



Obr. 4.1 Princip stříhání pomocí stříhadla [1]

Výstřížek se oddělí dříve, než projde střížník celou tloušťkou stříhaného materiálu a následně je výstřížek vytlačen. S ohledem na to nejsou okraje stříhových ploch zcela rovinné a střížná plocha má určitou drsnost, která není v ploše rovnoměrně rozdělená. Místa, kde došlo k prvnímu výskytu trhlin, jsou drsnější, než ostatní střížné plochy. Oddělení však nenastane přesně v žádané rovině a to proto, že materiál je elastický, tvárný a napětí způsobuje tlak nožů na celé ploše [1].

Rozdělení stříhání:

- *stříhání rovnoběžnými noži,*
- *skloněnými noži,*
- *kotoučovými noži,*
- *noži na profily a tyče.*

#### 4.1.1 Speciální způsoby stříhání

Mezi speciální způsoby patří *stříhání pomocí pryže* a *stříhání se zvýšenou rychlostí*.

*Stříhání pomocí pryže* se používá pro stříhání výstřižků z tenkého plechu. Nástrojem je zde ocelová deska o tloušťce 6 mm až 10 mm, jejichž obrys je shodný s obrysem konečného výrobku. Protinástrojem je pryž, která je buď uzavřená v rámu, nebo je volně položená na součástku, polotovár. Nástrojem na stříhání pryží lze dělat operace ostříhování, děrování otvorů a sloučené operace ostříhování a děrování. Pryžová deska má tloušťku 150 mm a je složena z více kusů. Ocelový rám je velmi namáhaný, stejně jako střížná deska, která musí být hladká, aby nezanechala stopy na výstřižku. Výhody spočívají v jednoduchém a levném nástroji, možnost stříhat více součástí najednou, je zde možná kombinace s tažením. Nevýhody jsou velký odpad, omezení tloušťkou a malá životnost pryže.

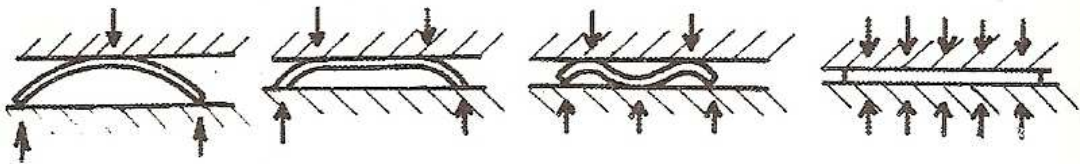
*Stříhání se zvýšenou rychlostí* je založeno na zmenšení objemu s vyčerpanou plasticitou na minimum, dráhy trhlin od střížných hran jsou velmi blízké a výsledkem jsou kolmé a rovinné střížné plochy. To vše je možné pouze v kritických rychlostech, pro uhlíkové oceli  $3 \text{ m.s}^{-1}$  až  $5 \text{ m.s}^{-1}$  [1].

## 4.2 Ohýbání – princip a metody

Ohýbání je proces tváření, při kterém je materiál trvale deformován do různého úhlu ohybu s menším nebo větším zaoblením hran. K ohýbání používáme nástroje – ohýbadla, skládací se z ohybníku a ohybnice. Výrobkem je výlisek, ohybek. Ohnutí tělesa do žádoucího tvaru využívá stejných zákonů plasticity, jako ostatní způsoby tváření – překročením meze kluzu dosáhneme oblasti plastické deformace [1].

## 5 ROVNÁNÍ

Rovnění je technologie, která se používá k odstranění nežádoucí deformace, která vznikla buď manipulací anebo ve výrobě. Rovnění tlakem si lze představit jako „obrácený“ ohyb, při kterém uvádíme křivé části do roviny, viz obr. 5.1 [1]. Platí zde pravidlo současného působení elastických deformací s plastickými – takže po zrušení vnějších sil rovnané těleso odpruží – což se projeví zbytkovým zakřivením [1].



Obr. 5.1 Rovnění výlisku tlakem mezi rovnými deskami [1]



## 6 TAŽENÍ

Tažením plechů a pásů vzniká prostorový výlisek nerozvinutelného tvaru. Podle tvaru výlisku můžeme proces tažení dělit na tažení měkké a hluboké, tažením bez a se ztenčením stěny, tažení rotačních a nerotačních tvarů a dále tažení nepravidelných tvarů (karosářské výlisky) [1].

### 6.1 Speciální způsoby tažení

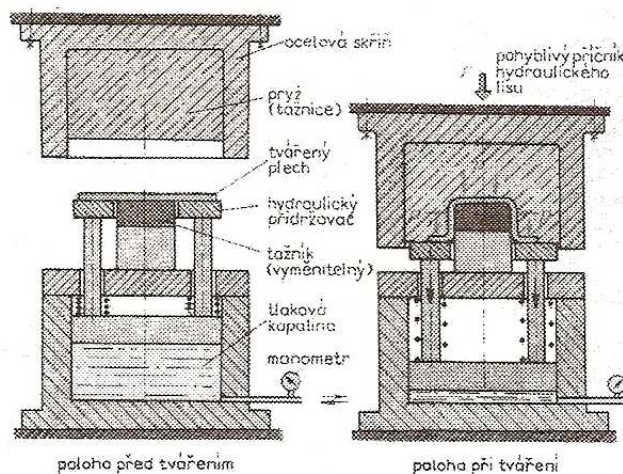
Speciální způsoby tažení se používají buď pro výrobu speciálních tvarů výtažků anebo se používají způsoby, využívající místo kovového nástroje jiné prostředí [1].

#### 6.1.1 Tváření pryží – metoda Guerin

Tato technologie je vhodná pro různé druhy stříhání, ohýbání, jednoduché tažení. Princip metody je založen na elasticitě pryže, která jev ocelové skříni. Výhodou je, že pryž nezanechává na povrchu žádné stopy. Nevýhodou je potřeba velkých sil, i když velké tlaky působí kladně na zvýšení plasticity. Je možné používat všechny typy lisů. Pryž se používá o různé tvrdosti, pro stříhání je tvrdost vyšší, než je pro tažení [1]. Z důvodu použití pryží při speciálních způsobech tváření musíme znát její skladbu a charakteristiku, abychom na danou operaci mohli vybrat pryž s potřebnými vlastnostmi. O složení a vlastnostech pryží je dále pojednáno v kapitole 9.

#### 6.1.2 Tváření pryží – metoda Marform

Tato metoda je vhodná i pro hluboké tažení ocelových i neželezných plechů. Rozdíl je ve vrstvě pryže, která je zde větší viz obr. 6.1 [1]. Výška pryže musí být trojnásobná, než je výška výlisku, aby nedocházelo k rychlému opotřebení a ztrátě elasticity pryže [1].



Obr. 6.1 Tažení metodou Marform [1]

### 6.1.3 Tváření kapalinou – metoda Wheelon

Obdoba metody Guerin, kdy se však místo pryže používá kapalina, která je umístěna v pryžovém vaku. Tlak kapaliny je veliký. Tato technologie je vhodná pro mělké tažení [1].

### 6.1.4 Tváření kapalinou – metoda Hydroform

Tato technologie je podobná metodě Marform, také se používá pro hluboké tažení, ale místo pryže se používá nádoba s kapalinou, která je uzavřená poměrně tenkou deskou z pryže. Nejdříve se přitlačí přídržovač, aby se nezvlnily okraje a potom se tažník vtláčuje do nádrže a materiál se tváří. Nadbytek vody se vypouští ventilem. Hydrostatický tlak lze regulovat [1].

### 6.1.5 Hydromechanické tažení

Pro tváření s požadavkem většího zdvihu (například hlubší tah) je jako pružné prostředí výhodnější tlaková kapalina. Proces bývá často uváděn pod názvem hydromechanické tažení a lze při něm s úspěchem používat i přídržovače. Tažník tváří plech do tažné komory, kde je však kapalina. Kapalina působí hydrostatickým tlakem na plech, který se tlačí na celou plochu tažníku [1].

## 7 NEKONVENČNÍ METODY

Mezi nekonvenční metody tváření patří technologie, které mají výrazně odlišné buď rychlosti tváření (například stříhání se zvýšenou rychlostí, tváření výbuchem), všestranné působení tlaku (vícecestné kování), kombinací způsobů (termální tváření) [1].

### 7.1 Elektrohydraulické tváření

Nejčastějším způsobem elektrohydraulického tváření je tažení výlisků z plechů. Princip je založen na elektrickém výboji v kapalinách mezi elektrodami s regulovatelnou vzdáleností, při kterém se přemění elektrická energie na tlak, teplo a záření. Vzniká rázová vlna, která materiál tváří [1].

### 7.2 Elektromagnetické tváření

Princip metody je založen na využití odpudivých účinků dvou nesouhlasných magnetických polí a to v cívice a v tvářeném materiálu, který je vodivý. Zde vzniká tlakový účinek od silného magnetického pole na elektricky vodivé kovy. Rychlým vybitím proudu v cívice se indukuje v tvářeném materiálu proud opačného smyslu a tím i opačného magnetického pole [1].

### 7.3 Frekvenční tváření

Kmitání o určité frekvenci se v tváření používá kvůli snížení tření, zvýšení plasticity, zvýšení čistícího účinku v důsledku turbulence mazadla. Nejvíce se používá ultrazvuk, který způsobuje kompresy a dekompresi [1].

### 7.4 Termální tváření

Principem je tváření při teplotách, kdy materiály zaznamenávají největší přírůstky přetvoření, protože plasticita není lineární funkcí teploty. Ohřev je buď celobjemový nebo pouze v místech plastické deformace, ale oblasti přenosu tvářecích sil se chladí [1].

## 7.5 Tváření výbuchem

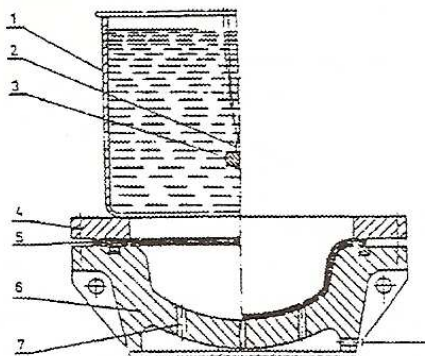
Využíváním energie výbušnin při explozivním tváření kovů je možno dosáhnout velmi efektivních výsledků v celé řadě strojírenských odvětví. Výbušnin může být použito nejen k vlastnímu lisování plechu, složitých dutých součástí, tváření objemovému, ale též ke svařování, zpevňování kovů, děrování a podobně. Příklad výrobku po tváření výbuchem je na obr. 7.1 [4].



Obr. 7.1 Výlisek přepravního sudu tvářen technologií pomocí výbuchu [4]

Celá řada operací je přímo předurčena pro zpracování použitím energie výbušnin. Výhodou této metody je, že tato metoda umožňuje dosažení velkých úspor na zařízení při malosériové výrobě, kdy je možno dosáhnout mnohem větších tlaků než u lisů a zvláště umožňuje zpracování nesnadno tvářitelných kovů o vysoké pevnosti, kterých je používáno v moderní technice [4]. Mezi další výhody řadíme rychlost provedení, v jaké tato operace dokáže vykonat potřebný úkon a možnost tvářet dílce obrovských rozměrů na jednu pracovní operaci. Nevýhodou je právě daná podstata tvářecího procesu – **výbuch** – jelikož se jedná o manipulaci se střeliviny, trhavinami a jinými výbušninami, je třeba dbát maximální pozornosti a dodržovat vyšší stupeň bezpečnosti. Podstatou metody je nahrazení síly a rychlosti lisu na materiál účinkem tlakové vlny od exploze. Rychlost tváření je nad hranicí  $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tlaková vlna může působit buď **přímo** (výbušnina je položena přímo na materiálu) anebo **nepřímo** přes prostředí. Nejčastěji se používá vzduch, voda, písek nebo hlína, pryže. Rychlosti zatěžování jsou kolem  $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , tlaky kolem

10000 MPa a teploty kolem 1000 K. Tvar výlisku je přesný, zpětné odpružení téměř žádné. Princip tváření výbuchem na obr. 7.2 [1].



Obr. 7.2 Jednoduché tažení na jednu operaci: 1 - nádoba, 2 - rozbuška, 3 - nálož, 4 - přidržovač, 5 - plech, 6 - lisovnice, 7 - výfuky [1]

Metoda tváření výbuchem je založena na využití kinetické a tlakové energie rozšiřujících se plynů, vzniklých při výbuchu. Výbušniny, kterých požíváme jako zdroje energie, mají široké rozmezí vlastností. Podle použití a rychlosti výbušné přeměny dělíme na čtyři základní skupiny [4]:

➤ **Třaskaviny** – jsou látky, u nichž výbušná přeměna probíhá detonací. Energeticky jsou poměrně slabé, ale vyznačují se tím, že potřebují k uvedení do výbuchové reakce dodání velmi malé počáteční energie. Z tohoto důvodu jsou používány prakticky jen v zápalkách, roznětkách a rozbuškách, které slouží k iniciaci trhavin nebo střelných prachů. Trhavin pak konají vlastní práci. Prakticky používané třaskaviny jsou například azid olova, tetrazen, trinitroresorciát olovnatý a třaskavá rtuť.

➤ **Trhavin** – jsou látky o velkém energetickém obsahu, jichž při tváření kovů výbuchem používáme převážně jako hlavního zdroje energie. Výbušná přeměna nastává u nich po iniciaci třaskavinou ve velmi krátkém čase. Uvolnění energie podle velikosti nálože nastane prakticky v několika mikrosekundách. V této době se uvolní průměrně z jednoho kilogramu trhavin asi  $427000 \text{ J.kg}^{-1}$  energie. Výbušný tlak se pohybuje v rozmezí  $1 - 3 \cdot 10^5 \text{ MPa}$  a počáteční rychlost šíření rázové vlny dosahuje hodnot až  $9000 \text{ m.s}^{-1}$ . K trhavinám řadíme například tritol, pentlit, hexogen a kyselinu pikrovou. Při tváření kovů výbuchem se nejčastěji používá průmyslových trhavin amonoledkových a želatinovaných. Jsou to například Permonex V19, Penurit 20, Infernit PN 40, Semtinit a další. Vzhledem k tomu, že tváření kovů je prováděno převážně v prostředí vody, jeví se z tohoto hlediska nejvýhodnějšími trhavinami želatinované, které odolávají vlhkosti.



➤ ***Střeliviny*** – jsou látky energeticky o něco slabší než trhaviny. Od těch se liší tím, že jejich výbušná přeměna neprobíhá detonační rychlostí, ale uvolňování energie nastává vlastně hořením. Rychlost tohoto hoření se pohybuje v rozmezí maximálně několika centimetrů za sekundu při normálním tlaku a vzrůstá se stoupajícím tlakem. Uvolnění energie proběhne v čase několika milisekund. Vzhledem k pomalejší výbušné přeměně je výkon podstatně menší než u trhavin. Při tváření kovů používáme střeliviny v zásadě jen v uzavřených systémech, případně nám slouží k urychlení projektilu (razníku). Který může dosáhnout rychlosti až  $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Známou používanou střelivinou je bezdýmný prach nitrocelulózový, nitroglycerinový a diglykolový prach.

➤ ***Pyrotechnické slože*** jsou specifickým druhem výbušnin. Jsou to obvykle mechanické směsi hořlaviny, oksylichovadel a dalších přísad, podle účelu slože. Pyroslože jsou méně citlivé k mechanickým podmínkám. Aktivovány jsou plamenem a jejich výbušnou přeměnou je explozivní hoření.

***Výbuch*** - chápe se obecně jako nevratný děj spojený s rychlým uvolněním energie, kdy v první fázi dochází k transformaci určitého druhu energie v energii silně stlačených plynů a následně pak k expanzi těchto plynů do okolního prostoru a vykonání mechanické práce. Výbuch je doprovázen uvolněním tepelné energie a vznikem plynných zplodin, které svou tepelnou, potenciální a kinetickou energií uvedou okolí místa výbuchu do pohybu. Společnou vlastností výbušnin je to, že ve své chemické struktuře obsahují oksylichovadlo (kyslík) i palivo (hořlavina) a chemická přeměna tak probíhá i bez přítomnosti atmosférického kyslíku [5]. Chemické výbušniny mohou uvolňovat svoji energii v zásadě dvěma způsoby a to buď ***detonací***, nebo ***explozivním hořením***. Vedle těchto základních přeměn může dojít k deflagraci, která označuje nestandardní a nestabilní hoření některých výbušnin a dále k pomalým chemickým reakcím ve struktuře výbušniny – k rozkladu, který nemá charakter výbuchu, ale mění vlastnosti výbuchu (tzv. stárnutí nebo degradace výbušnin) [5].

➤ ***Explozivní (výbuchové) hoření*** je druh chemického výbuchu probíhajícího relativně nízkou rychlostí, která je nižší než rychlost zvuku ve zplodinách výbuchu. Rychlosti hoření se za normálních podmínek pohybují od několika mm až několika cm za sekundu. Rychlost hoření však roste s rostoucí teplotou výbušniny a zejména s rostoucím okolním tlakem.

➤ ***Detonace*** je výbušná přeměna probíhající ve výbušnině vysokou rychlostí, která je vyšší než rychlost zvuku ve zplodinách výbuchu. Rychlost této přeměny – detonační

rychlost – se pohybuje řádově v tisících metrech za sekundu a prakticky není ovlivňována teplotou a ani okolním tlakem [5].

Podstatou chemických výbušných přeměn jsou chemické reakce, které se vyznačují těmito základními charakteristikami [4]:

➤ **Reakce je exotermická**, tj. doprovázena přeměnou chemické energie na tepelnou. Její velikost je udávána hodnotou výbuchového tepla a je vlastně mírou uvolnění celkové energie. U výbušnin se pohybuje v rozmezí mezi 128000 J - 854000 J.

➤ **Reakce probíhá vysokou rychlostí**, přičemž rychlost závisí na druhu použité výbušniny a na vnějších podmínkách. Rychlosti hoření se pohybují v rychlostech mezi  $1500 \text{ m.s}^{-1}$  –  $9000 \text{ m.s}^{-1}$ .

➤ **Při reakci dochází k velkému vývinu plynů**, které 800 – 1600krát převyšuje původní objem výbušniny. Při výbuchové reakci se uvolňuje z 1 kg výbušniny průměrně 700 litrů – 900 litrů zplodin při normálním tlaku a teplotě 20°C.

K tomu, aby se plech při tváření výbuchem deformoval do požadovaného tvaru, je potřeba na něj působit určitým tlakem a dodat mu zcela určité množství energie. Kovy mohou snést okamžitá namáhání, která přesahují hranici, při níž dochází k poruše, je-li kov namáhán staticky. Při tváření vysokou rychlostí dochází ke zvyšování pevnosti, meze kluzu a často i tažnosti. Důležitou složku při tváření vysokou rychlostí zatěžování hrají i setrvační síly, které působí ve směru osovém, i radiálním. Výsledkem jejich působení je, že jsou vytvořeny výhodné podmínky pro dosažení mnohem většího místního přetvoření materiálu než při klasickém lisování. energii potřebnou k deformaci musíme dodat určitou maximální rychlostí, aby nedošlo k porušení materiálu. Při kritické rychlosti se nemohou totiž plastické deformace šířit tak rychle, aby odpovídaly zatížení, a dochází pak k lomu. Kritická rychlost rázu u většiny kovů se pohybuje v rozmezí  $60 \text{ m.s}^{-1}$  –  $150 \text{ m.s}^{-1}$ .

Způsob umístění náloží trhaviny je prakticky dvojitý. Trhavinu můžeme umístit přímo do styku s kovem nebo nálož umístíme do určité vzdálenosti od tvářeného kovu, přičemž energie výbušniny je přenášena prostřednictvím média. Je-li nálož umístěna přímo na kovu, dochází v místě styku trhaviny s kovem tlak několika set tisíc MPa. S rostoucí vzdáleností trhaviny od kovu nastává velmi rychlý pokles.

Při explosivním tváření je velmi důležitá volba přenosného média. Na přenosném médiu podstatně rovněž závisí velikost zatěžovacího impulsu. Technologii tváření výbuchem můžeme rozdělit podle různých hledisek, např. podle rychlosti zatěžování, na tváření objemové a na tváření plechů, nebo podle druhu použité výbušniny na tváření pomocí střelivin nebo trhavin [4].

Při stanovení velikosti nálože trhaviny při tváření výbuchem musíme zohlednit tyto faktory:

- kvalita tvářeného materiálu a jeho chování za vysokých rychlostí zatěžování, která je charakterizovaná kritickou rychlostí rázu daného kovu,
- celková velikost tvářeného materiálu,
- duh použité nálože,
- přenosové médium tlakové vlny a celková účinnost vlastního výbuchového procesu.

Při výpočtu velikosti nálože trhaviny vycházíme ze vztahu, že tvářenému materiálu musíme dodat určité množství kritické měrné energie [4]:

$$U_{kr} = \frac{1}{2} \cdot v_{kr}^2 \cdot \rho \quad (8.1)$$

Kde:  $U_{kr}$  - je kritická měrná energie [J],

$v_{kr}^2$  - je kritická rychlost rázu tvářeného materiálu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$\rho$  - měrná hmota tvářeného materiálu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

Kritickou rychlost rázu  $v_{kr}$  můžeme zjistit pro různé kovy teoreticky nebo experimentálně.

**Kritická energie  $U$**  - množství energie, kterou dodáme tvářenému materiálu z energie výbušniny. Toto množství energie, přivedené z výbušniny během chemické přeměny, zvětšíme o příslušné ztráty výbuchového procesu. Tyto ztráty jsou zahrnuty v koeficientu  $\alpha$ , který vyjadřuje prostorový úhel využití energie výbušniny a v koeficientu  $\mu$ , který vyjadřuje účinnost vlastního výbuchového procesu. Váhu nálože trhaviny potřebné pro tváření dílce vypočteme ze vztahu:

$$G = \frac{U}{W} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{\mu} \quad (7.2)$$

Kde:  $G$  - je váha trhaviny [kg],

$U$  - je celková kritická energie [J],

$W$  - je energetický ekvivalent použité výbušniny [J/kg],

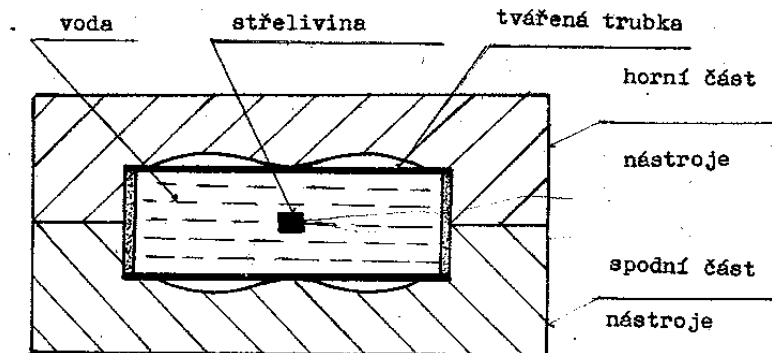
$\alpha$  - je úhel využití energie výbušniny [%],

$\mu$  - je účinnost vlastního výbuchového procesu [%].



### 7.5.1 Tváření pomocí střelivin

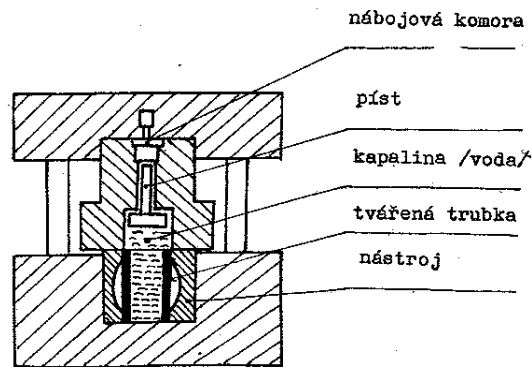
Pro tváření dílců malých rozměrů a vhodných tvarů se používá střelivin. Těch se používá k urychlení projektilu – razníku (při tváření objemovém) nebo pro tváření plechů (v uzavřených zařízeních). Prachové plyny nám přetvářejí materiál přímo, působí prostřednictvím kapaliny nebo pístu, případně vystřelují materiál proti zápusťce. Schematické znázornění zařízení pro tvarování trubek pomocí střelivin je na obr. 7.3 [4].



Obr. 7.3 Tvarování trubky pomocí střelivin [4]

Je to dvoudílný nástroj, který je na obou koncích uzavřený. Jako přenosného média je zde použito vody. Nálož bezdýmného prachu je umístěna v polyetylenovém sáčku uprostřed zařízení. Je-li síla nebo deformace tvářeného materiálu větší, používáme více náloží, přičemž každou umístíme uprostřed maximální deformace. Aby nedošlo k porušení tvářeného materiálu rýhováním (součástkami kovového obalu rozbušky nebo přívodním drátem od elektrického palníku), chráníme vnitřní povrch tvářeného dílce tenkou vrstvou nějakého mazadla nebo slabou folií z umělé hmoty.

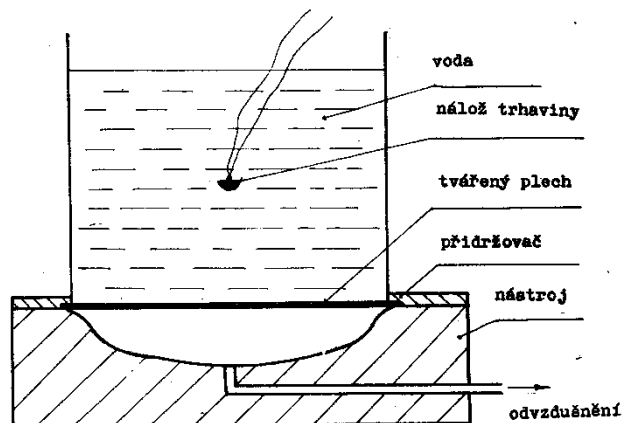
Na obr. 7.4 je schematicky znázorněno zařízení, při němž energie prachových plynů je přenášena na kapalinu prostřednictvím pístu. Odpálení bezdýmného prachu je provedenou zvláštní nábojové komoře. Tento způsob tváření je vhodný pro tvarování trubek malých průměrů a materiálů slabých, u kterých dochází velmi snadno k porušení vlivem překročení kritické rychlosti rázu tvářeného materiálu [4].



Obr. 7.4 Tváření pomocí střelivin prostřednictvím kapaliny a pístu [4]

### 7.5.2 Tváření pomocí trhavin

Vzhledem k tomu, že trhavin jsou látky brizantní, není jich používáno k urychlení projektilu nebo v uzavřených systémech. Způsob práce při tváření pomocí trhavin je v podstatě odlišný od tváření pomocí střelivin. Při výbuchu je využíváno energie rázové vlny, která se šíří prostředím. Nejčastěji se používá k přenosu rázové vlny vody. Nástroje pro tváření pomocí trhavin jsou ukládány buď do vodních nádrží, nebo je vytvářen nad tvářeným plechem vodní polštář pomocí polyetylenových vaků. Součásti tvářené výbuchem se rozměrově velmi málo mění, prakticky nedochází k zpětnému pružení materiálu a konečný tvar vylisku je velmi dobrý. Toto lze vysvětlit tím, že rázová vlna při výbuchu působí na celý povrch tvářeného materiálu téměř najednou, zatímco při klasickém lisování soustřeďuje napětí na čelo razníku. Úspory dosažené použitím tohoto způsobu tváření jsou případ od případu různé. Avšak praxe ukazuje, že je často dosaženo až 80% - 90% úspor na nákladech proti klasickému lisování. Typickým příkladem tváření pomocí trhavin je lisování kotlového dna, schematické zobrazení je na obr. 7.5 [4].



Obr. 7.5 Tváření kotlového dna výbuchem [4]

## 8 PRYŽE

Pryže jsou kaučukové směsi tvořené kaučukem a dalšími gumárenskými surovinami.

### 8.1 Kaučuk

Kaučuk jako surovina je charakterizován neobvyklou kombinací fyzikálních vlastností: *vysoká elastičnost* při nepatrné tvrdosti a mimořádně *velkou tažností*. Pod pojmem kaučukovitý stav bývá chápána schopnost hmoty vracet se po uvolnění síly působící deformaci tahem, tlakem nebo torzní rychle do původního geometrického tvaru. Látky, které vykazují kaučukovité vlastnosti při normální teplotě, se označují jako elastomery. Podle jiné definice jsou kaučuky makromolekulární látky schopné přecházet vulkanizací ze stavu převážně plastického do stavu převážně elastického. Kaučuky jsou nejdůležitější složkou gumárenských směsí. V rámci každého typu kaučuku často existuje řada druhů s poněkud odlišnými vlastnostmi. Některé vlastnosti kaučuků můžeme ovlivnit použitím přísad. Příspěvy ovlivňují řadu vlastností současně. Vlastnosti uváděné pro různé typy kaučuků a přísad jsou cenným vodítkem, musí se však používat s velkou opatrností a vždy prověřit pro danou aplikaci [6].

### 8.2 Skladba kaučukových směsí

Pryž se získává vulkanizací kaučukové směsi. Sestavit správně kaučukovou směs pro daný účel předpokládá mít dobrý přehled o gumárenských surovinách a vědět, jak tyto materiály ovlivňují vlastnosti směsí a pryže. Správné vyvážení jednotlivých vlivů vyžaduje jak teoretické znalosti, tak i dostatek zkušeností. Základní složkou směsi je kaučuk, který dává směsi i pryži základní charakteristické vlastnosti, proto modifikujeme vlastnosti kaučuku tak, aby výsledný produkt co nejlépe vyhovoval jak aplikaci, tak i požadavkům na zpracování [6].

### 8.3 Základy skladby směsí

Kaučuková směs obsahuje zpravidla tyto složky [6]:

1. elastomer – kaučuk přírodní, syntetický nebo jejich smě, popř. doplněné regenerátem,
2. vulkanizační činidlo – nejčastěji síru,
3. urychlovač (nebo směs urychlovačů) vulkanizace,
4. aktivátor vulkanizace,
5. ochranné látky proti stárnutí a únavě (antioxidanty),
6. plniva – neaktivní nebo aktivní,
7. změkčovadla.

Dále může obsahovat:

8. pigmenty a
9. zvláštní přísady.

### 8.4 Volba elastomeru

Základní složkou směsi je kaučuk, který dává směsi i pryži základní charakteristické vlastnosti. Správná volba elastomeru je založena na srovnání aplikačních podmínkách výrobku a vlastnostech kaučuku. Při volbě kaučuku je nutno věnovat pozornost rozsahu teplot použití, odhadnout i zpracovatelnost směsi ve vztahu ke konstrukci výrobku. Pokud není k dispozici kaučuk s požadovanými zpracovatelskými vlastnostmi, může být upraven (např. mastikací), nebo se použije směs různých molekulových hmotností. Kaučuk jako základní složka směsi se někdy doplňuje regenerátem [6].

### 8.5 Vulkanizační činidla

Vulkanizační činidla jsou látky, které mají schopnost vytvářet chemickou reakcí příčné vazby mezi molekulami kaučuku. Zesíťováním – vulkanizací – se stává z kaučuku, resp. z kaučukové směsi, technicky použitelný materiál – *pryž*. Nejznámější vulkanizační činidlo je síra, oxidy kovů, reaktivní pryskyřice.

Další složkou vulkanizačního systému je **urychlovač**. Vulkanizační činidlo vulkanizaci umožňuje, urychlovač a aktivátor upravují její průběh a stupeň a do značné míry i mechanické vlastnosti vulkanizátu [6].

## 8.6 Urychlovače

Další složkou vulkanizačního systému je urychlovač. Vulkanizační činidlo vulkanizaci umožňuje, urychlovač a aktivátor upravují její průběh a stupeň a do značné míry i mechanické vlastnosti vulkanizátu [6].

## 8.7 Aktivátory

Aktivátory vulkanizace zvyšují účinnost síťování, tj. za stejných podmínek vulkanizace zvyšují koncentraci příčných vazeb. Jako aktivátoru se používá téměř ve všech směsích oxidu zinečnatého. Protože přírodní kaučuk obsahuje kolísavé množství mastných kyselin, je třeba přidávat některou organickou kyselinu, nejčastěji stearovou, aby byl převáděn zinek na formu rozpustnou v kaučuku [6].

## 8.8 Změkčovadla

Změkčovadla jsou oleje nebo nízkomolekulární pryskyřice, které se rozpouštějí v daném kaučuku, snižují mezimolekulární síly mezi jeho řetězci a zvyšují jeho deformovatelnost. Při nízkých koncentracích urychlují změkčovadla dispergaci plniv ve směsi. Při vyšším dávkování snižují změkčovadla viskozitu a elasticitu směsi a tím snižují spotřebu energie při zpracování [6].

## 8.9 Plniva

Základní vlastnosti směsí se upravují plněním a tím se činí vhodnými k použití. Přítomnost plniv má významný vliv na vlastnosti vulkanizátu. U většiny vulkanizátů zlepšují plniva také odolnost proti oděru. Zlepšení vlastností vulkanizátů přídavkem plniv se nazývá ztužení. Plniva používáme dvou druhů [6]:

➤ **Aktivní plniva** -Aktivní plniva jsou ztužovala, která přechodně zlepšují pevnost. Velikost ztužení závisí na struktuře a velikosti částic plniva a na aktivitě jeho povrchu. Ztužující plniva zlepšují fyzikálně mechanické vlastnosti, pevnost, pružnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení. Nejznámější jsou saze, které se vyrábějí z organických látek chemickými reakcemi za vysokých teplot [6].

➤ **Neaktivní plniva** - Neztužující plniva zpravidla zvětšují objem, zlevňují výrobek. V praxi se nejvíce používají minerální plniva (např. kaolin, křída), která představují skupinu gumárenských plniv různého chemického složení a s různou aktivitou [6].

## 8.10 Pigmenty

Použití pigmentů na vybarvení pryží je pro všechny elastomery stejné. U pryží bílých nebo světlých se musí používat elastomerů a antioxidantů na světle nebarvících. K vybarvování se používá nejčastěji vulkánových barviv [6].

## 8.11 Vulkanizace

Je to děj, při kterém vznikají v kaučukové směsi pevné chemické vazby mezi jednotlivými řetězovými molekulami za pomoci vulkanizačních činidel. Optimální hustota síťové prostorové struktury závisí na teplotě a čase, po které působí na elastomerní směs. Vzájemný vztah teploty a doby vulkanizace se vyjadřuje – teplotní koeficient vulkanizace. Ten udává vzrůst rychlosti vulkanizace při zvýšení teploty o 10°C (jeho hodnoty jsou 1,8 - 2,5 v závislosti na skladbě elastomerní směsi). Teplota vulkanizace je funkcí i typu kaučuku a volí se v rozmezí 140°C - 200°C. Vyšší teplota – zkrátí se vulkanizační čas, zvýší se teplotní spád se všemi důsledky. Pro kvalitní vulkanizát je důležitý tlak při vulkanizaci [7].

Provozní způsoby vulkanizace jsou dva [7]:

➤ **Kontinuální** ve vulkanizačních tunelech (solné lázně, horkovzdušné tunely, MW tunely), bubnových lisech.

➤ **Diskontinuální** vulkanizace ve formách, přímé páře, horké vodě, horkém vzduchu, bubnových lisech.

Technologický postup vulkanizace [7]:

- tvarování elastomerní směsi do tvaru výrobku (za tepla, za studena),
- zahřívání na vulkanizační teplotu,

- výdrž na vulkanizační teplotě – vulkanizace (teplota, čas, tlak),
- vyjmutí výrobku z formy (výrobek se ve formě nechladí).

Nejvíce gumárenských výrobků se vulkanizuje ve formách – *ve vulkanizačních lisech*. Lisování ve formách se vyznačuje tím, že tvarování i vulkanizace probíhá v jedné operaci. V první fázi vulkanizačního cyklu se přebytek materiálu vytlačí v podobě přetoků do přetokových kanálků. Aby se zabránilo otvírání formy během vulkanizace, musí být uzavírací tlak vyšší než vnitřní. Vulkanizace pryžových výrobků ve formách lisováním má dvě zásadní nevýhody. Nevýhodou je složitost přípravy nálože materiálu, při níž je potřeba zamíchanou kaučukovou směs nejdříve zpracovat válcováním nebo vytlačováním, při čemž se tyto polotovary dále sekají, krájejí, řežou apod. na příslušné dílce a ty se pak skládají nebo lepí na vlastní nálož do formy. Druhou nevýhodou je nedokonalost vlastní technologie lisování, při níž se získávají výlisky, jež mají přetoky. Byla proto oprávněná snaha tyto nedostatky odstranit. Podstata bezpřetokového lisování tkví v tom, že je nutno formu nejdříve uzavřít a pak do ní přetlačením nebo vstřikováním teprve dopravit nálož. Technologie vulkanizace s bezpřetokovým lisováním obsahuje dva základní způsoby, *přetlačování* a *vstřikování* [7].

Při *přetlačování* jde o protlačování kaučukové směsi kanálky do vulkanizační formy.

Výrobní způsob *vstřikováním* se uplatnil nejdříve ve zpracování plastických hmot. Podle způsobu předehřevu kaučukové směsi a způsobu vstřikování do formy rozeznáváme dva typy strojů: *pístové* a *šnekové*.

Vulkanizace probíhá ve více prostředích [7]:

- *Vulkanizace v přímé páře* - Vulkanizace přímou párou se provádí v kotlích, které jsou stojaté nebo ležaté. Kotel je vybaven ventily pro přívod a odvod páry a pro odtok kondenzované vody a dále tlakoměrem. Vulkanizace přímou párou se používá hlavně pro technickou pryž. Kaučuková směs musí být již zformována do konečného tvaru. Jsou to výrobky získávané vytlačováním (profily, hadice), válcováním (celopryžové zástěny) nebo připravené ruční konfekcí.

- *Vulkanizace v horké vodě* - Vulkanizace v horké vodě je zvláštním případem vulkanizace v přímé páře. Vulkanizovaný předmět je při tom uložen ve vodě. Tohoto způsobu se využívá např. u některých masívních výrobků z tvrdé pryže.

- *Vulkanizace v horkém vzduchu* - Některé výrobky, u nichž přímý styk s párou způsobuje různé závady, se vulkanizují v horkém vzduchu. Vulkanizace horkým vzduchem v kotli se provádí pod tlakem 0,2 MPa - 0,4 MPa. Kaučukové směsi mohou totiž obsahovat

vlhkost nebo malé podíly těkavých látek, jejichž vinou se při zpracování vytvářejí ve fólii nebo vytlačené profilu drobné póry.

➤ **Vulkanizace v autoklávech** - Spojením vulkanizace v lise s vulkanizací v kotli vznikl tzv. autoklávový lis. Tlakový princip zůstává stejný jako u hydraulických lisů, avšak forma je obklopena ze všech stran párou. Topné desky jako vyhřívací mezičlánek odpadají. Tohoto způsobu vulkanizace se dosud používá, i když v malé míře, k vulkanizaci pneumatik, topných duší, plných obručí apod.

➤ **Kontinuální způsoby vulkanizace** - Jsou způsoby vulkanizace, u nichž prakticky nenastává přerušování technologického cyklu, který probíhá zcela plynule nebo jen se zcela krátkým přerušováním po celou dobu výroby [7].

➤ **Vulkanizace diskontinuální** - Vulkanizace probíhá v jednoetážových nebo dvouetážových vulkanizačních hydraulických lisech, kde jako vyhřívací médium je použita předeřtá pára. Proces probíhá diskontinuálně postupnou vulkanizací úseků surového dopravního pásu [7].

Hlavním důvodem vulkanizace je vylepšení mechanických a chemických vlastností. Z fyzikálních vlastností se zvýší pevnost v tahu, strukturní pevnost (odolnost proti dalšímu trhání), odolnost v oděru i pružnost, ale zároveň se sníží tažnost [7].



## 9 SOUHRN A ZHODNOCENÍ STUDIE

V tomto přehledu o možnostech moderní technologie zpracování materiálů bylo pojednáno o možnostech použití tvářecích technologií. Každý způsob má své neodmyslitelné zastoupení na poli zpracování kovů i jiných materiálů. Je zde rozděleno tváření, za jakých vnějších tepelných podmínek ho lze uskutečnit nebo jaký způsob se používá na tváření plošných a objemových dílců. Jsou zde uvedeny speciální způsoby tváření a to jak objemových (válcování, kování, protlačování), tak i plošných (stříhání, tažení).

U nekonvenčního tváření jsou uvedeny různé speciální procesy, při kterých dochází k tváření materiálu. Je zde uvedeno i tváření pomocí velké energie a rychlosti a to za pomoci výbuchu trhaviny nebo střeliviny. U tohoto způsobu tváření jsou uvedeny výhody i nevýhody. Mezi hlavní výhody při použití této technologie patří časová i finanční úspora při provedení operace. Praxe prokazuje, že využitím technologie tváření výbuchem ušetříme náklady o 80% - 90% oproti tváření lisováním.

Pro tváření používáme ve strojních systémech různé materiály nástrojů. Značné zastoupení mají i pryže. Pryž obecně má širokou škálu vlastností, které jsou vhodné pro použití v technologii tváření. Je však nutné zvolit pryž s odpovídajícími vlastnostmi vycházející z konečného použití nástroje v aplikaci.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 10 CÍL PRÁCE

Cílem práce je navrhnout tvářenou součást s kompletní výkresovou dokumentací. Dále určit technologii, kterou se výrobek vyrobí a dle vybrané technologie navrhnout tvářecí nástroj a jeho výrobní dokumentaci. Provést kontrolní pevnostní výpočet navrženého nástroje a v závěru práce shrnout ekonomické zhodnocení použité technologie.

## 11 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ NÁSTROJE

Pro studii byl vybrán výrobek, který je používán jako součástka v lékařském vyšetřovacím přístroji. Od zadavatele byla poskytnuta jednoduchá dokumentace výrobku. V dokončovací operaci je výrobek povrchově zpracován technologií chromování ve speciální lázni. Důvodem je požadovaná opakovatelná sterilizace.

Cílem práce je navrhnout technologii, která by odstranila svařování, jelikož původně byl tento výrobek vyráběn ze dvou polovin a následně svařen. Tato technologie řešila problém s obtížností výroby, ale vyskytovaly se nedostatky, které bylo nutno eliminovat. V místě sváru docházelo ke kontaminaci svařovaného materiálu nežádoucími prvky a po pokovení chromem následovalo v místě sváru k menší přilnavosti a jeho odlupování z povrchu výrobku. Následně docházelo k oxidaci a korozi svařovaných míst.

### 11.1 Návrh výrobní technologie

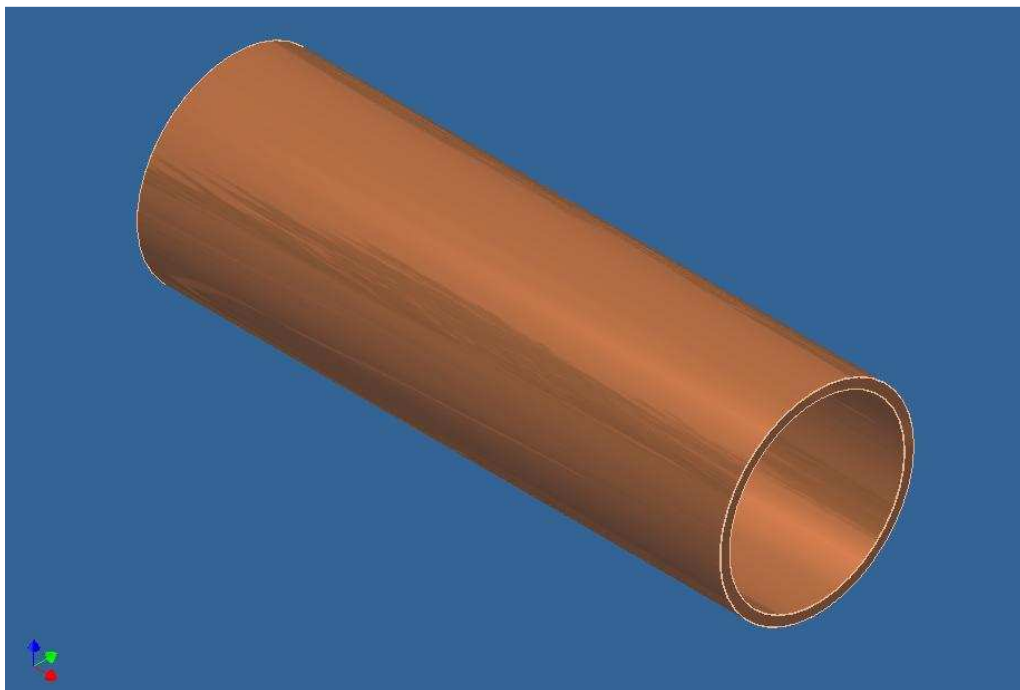
Obě poloviny výrobku vyráběného původní technologií byly vyhotoveny v hydraulickém lisu. Jedna polovina byla tvořena dílem, ve které byly vylisovány požadované tvary, a druhá představovala opačnou polovinu výrobku. Následovala úprava ploch pro svařování a touto technologií došlo ke spojení polovin. Poté byl povrch po svařování upraven a začištěn. Výrobek byl broušením zbaven otřepů po vystřížení, očištěn, vyleštěn, odmaštěn a na povrchu výrobku bylo provedeno pokovení chromem ve speciální lázni.

Použití výrobku požaduje, aby byl vyroben z jednoho kusu. Tvary požadovaných prolisů na výrobku jsou modelovány od osy polotovaru a tím je jejich vyhotovení obtížné běžnými technologiemi při zachování podmínky celistvosti během tvářecí operace. Pro dodržení podmínek zpracování polotovaru, kde odpadá technologie svařováním, je tedy navržena technologie tlaková za vysokých rychlostí. Je zvolena **nekonvenční technologie tváření výbuchem pomocí střeliviny**. Tato technologie umožňuje v tomto konkrétním případě tvářet vnitřní prostor trubky a vymodelovat tvary od středu pomocí působícího tlaku od expandující střeliviny. Jakmile bude tlak dostatečně veliký a překoná mez pružnosti použitého materiálu, začne se materiál před šířící se tlakovou vlnou tvarovat v povoleném směru. Tento směr je definován přesnou modelací budoucího tvaru, který bude vyhotoven ve tvářecím nástroji, ve kterém bude polotovar uzavřen. Tvářecí nástroj přesně určí materiálu povolený směr jeho tvarování před působící rázovou vlnou.

## 11.2 Vstupní polotovár

Výchozím materiálem je slitina mědi. Jako polotovár je použita tenkostěnná trubka o tloušťce 2,5mm viz obr. 11.1. Z principů tváření pomocí výbuchu vyplývá, že by se pro usnadnění tváření, umožní li to zadavatel a charakter užití konečného výrobku, se materiál tepelně upraví pro snížení jeho pevnosti a tvrdosti. Při použití tepelně neupraveného materiálu se mohou vyskytnout v kritických místech a ve vytvářených ohybech praskliny a trhliny.

Před samotným tvářením se slitina mědi musí tepelně rekrystalizovat do tvářecího stavu. Materiál je zahřán na teplotu cca 500°C a prudce ochladí ve vodní nebo solné lázni, čímž se zvýší jeho tažnost, tvárnost a změkne. Sníží se tím i hodnota tlaku potřebného k uskutečnění úplného dotvarování do všech krajních poloh požadovaného konečného tvaru.

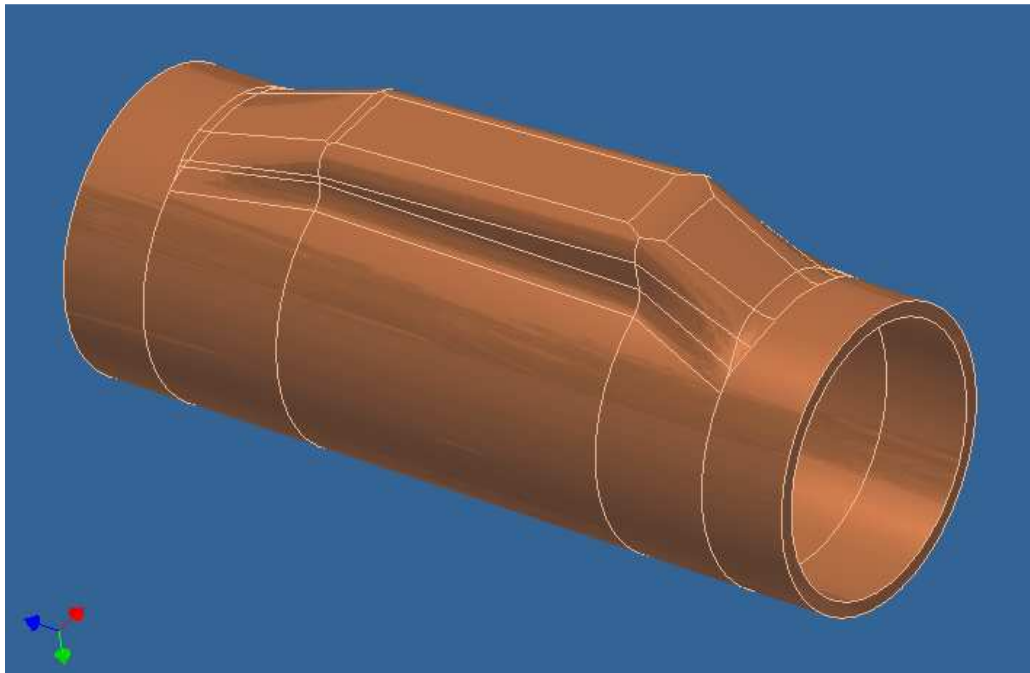


Obr. 11.1 Vstupní polotovár ze slitiny mědi

## 11.3 Tvar výrobku

Výrobek je asymetrický viz. obr. 11.2. Po tváření je důležitá kontrola rozměrů a rovnosti čel trubky. Z obou stran polotovaru, kde dochází k pozvolnému vystupování modelovaného tvaru nad hranici válce, může dojít po tváření k „sesunutí“ materiálu s ustupujícím tvarem z čela trubky. Z tohoto důvodu se výrobek vyrábí s technologickým

přídavkem. Při modelování tvaru, s rostoucím vnitřním objemem prostoru v trubce a zvětšováním povrchu výrobku, dojde k zeštíhlení stěny původního materiálu. V kritických místech, ohybech a nejvzdálenějším místě stěny v řezu od osy trubky, síla materiálu nesmí být menší, než uvádí zadavatel. Z původní síly stěny polotovaru 2,5mm nesmí být tvářený profil po operaci tenčí méně než 2mm.



Obr. 11.2 Tvar výrobku po tváření výbuchem

#### 11.4 Návrh nástroje pro tváření výbuchem

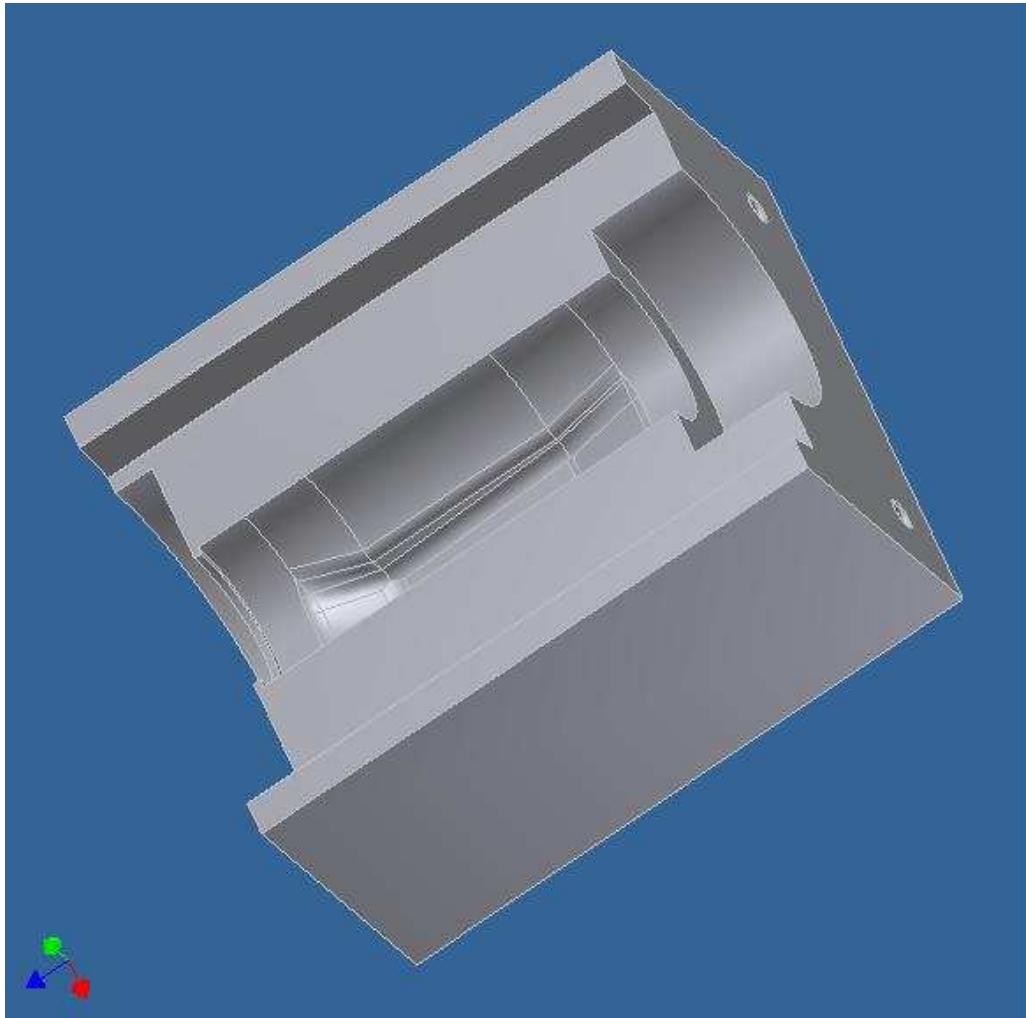
Nástrojem zde je tvářecí nástroj, do kterého se vloží tepelně upravený polotovar ze slitiny mědi. Tvářecí nástroj musí být po konstrukční stránce na tolik pevný, aby snesl dané zatížení při tváření pomocí výbuchu. Nástroj je složen z pěti hlavních demontovatelných částí. Ze dvou tvárníků nástroje, ve kterých je vymodelován konečný vnější tvar výrobku, dále spodní příruby s pryžovým tlumičem rázu a příruby s nábojovou komorou pro vložení a usazení *cvičného náboje*. Cvičný náboj zde představuje *zdroj energie a tlakového rázu* k provedení jedné tvářecí operace. K provedení jedné tvářecí operace je použit akustický náboj od firmy Sellier & Bellot 9mm P. A. Blanc s maximální hodnotou tlaku plynů 40MPa [10].

K přenosu tlakového účinku střeliviny na tvářené těleso se z pravidla používá jiného prostředí. Toho se užívá proto, aby hoření a expandování střeliviny nepoškodilo

tvářenou plochu. Jeden z dalších důvodů je rychlost přenosu a šíření rázové vlny. Nejčastěji se používá k tomuto přenosu vody. Voda je pro šíření energie rázové vlny nejvhodnějším prostředím, které přenáší energii a tlakový ráz střeliviny všemi směry přibližně stejnou rychlostí a působí na tvářený materiál téměř najednou. Dalším prvkem, který bude obsažen v tvářecím nástroji, je pryžová vložka, která je vložena do polotovaru uloženého v nástroji a bude přenášet impuls na polotovar od rázové vlny šířící se ve vodě, která je nalita do dutiny této pryže.

Vnitřní povrch tvárníku, který přichází do styku s povrchem polotovaru, musí být dokonale opracován a vyleštěn. Nečistoty mezi tvárníkem a trubkovým polotovarem před výbuchem budou mít po tváření za následek vyražení těchto nežádoucích objektů do povrchu výrobku. V těchto nerovnostech se následně může usazovat mastnota a nečistoty a to může mít za následek nedokonalé pokovení chromem a dojde k jeho odlupování.

Sestavený tvářecí nástroj jako celek bude vložen do čelistí, které sestavené části nástroje sevrou a až poté se provede samotný děj tváření.



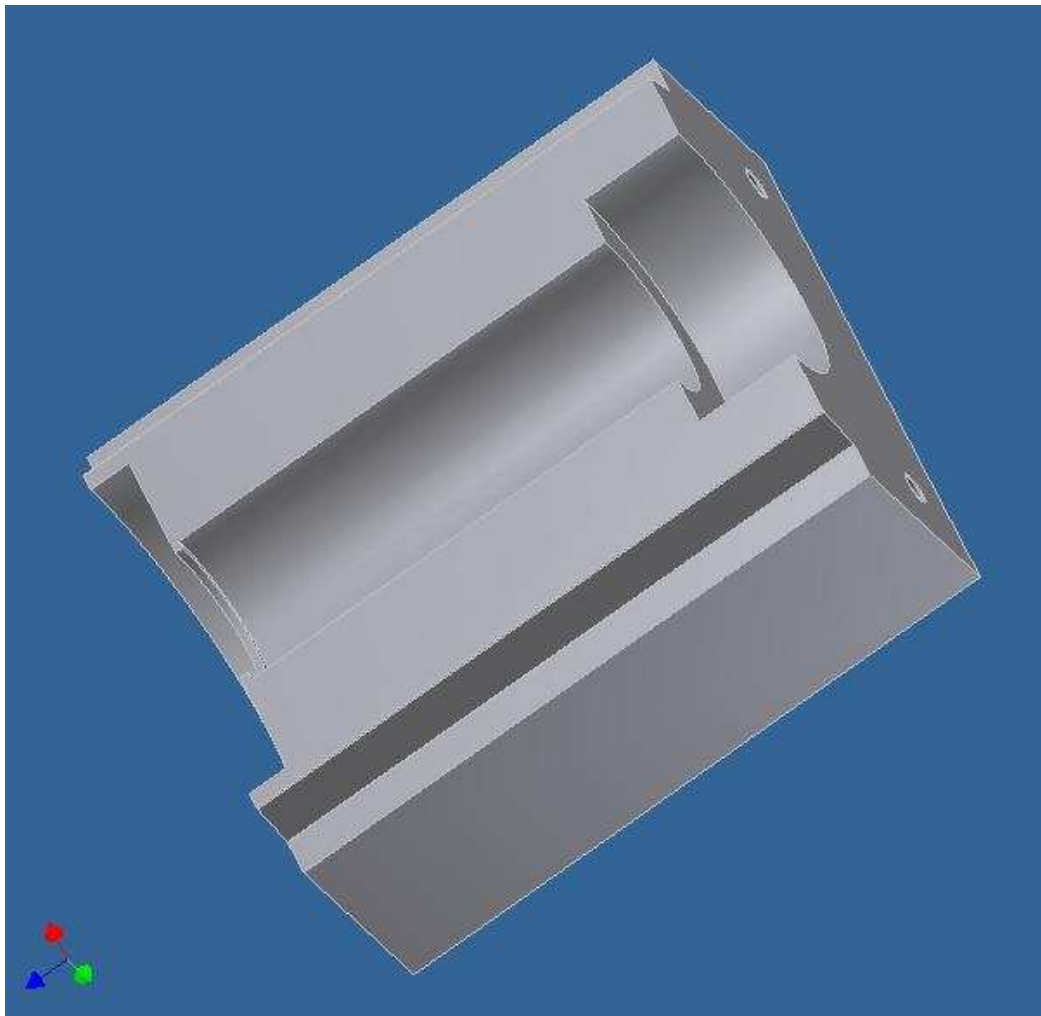
Obr. 11.3 Pravý díl tvárníku nástroje s vymodelovaným tvarem výrobku

Pravý díl tvárníku nástroje na obrázku 11.3 má vymodelovaný konečný tvar výrobku pro použitý polotovar z mědi. Tento polotovar musí být přesně uložen, aby se dodržely konečné rozměry dle výkresové dokumentace zadavatele. K tomuto opakovatelnému usazení slouží vytvořené osazení na dně tvárníku, o které se polotovar při usazení do nástroje opře čelem. To zajistí usazení polotovaru vždy ve stejné poloze. Při usazení polotovaru a sestavení nástroje vznikne mezi vnějším povrchem polotovaru a vymodelovaným tvarem v tvárníku dutina, ve které je vzduch. Při operaci se v tvářeném směru před ustupujícím materiálem začne tento vzduch stlačovat a zvyšovat svůj tlak. To má za následek zvyšování odporu proti tvářené ploše a nedojde k úplnému dotvarování polotovaru do požadovaného konečného tvaru. Z tohoto důvodu jsou v tvárníku v místě nejvzdálenější plochy vymodelovaného tvaru od osy polotovaru vyhotoveny dva otvory (kanálky), které jsou určeny k odvedení tohoto vzduchu. Tyto otvory mají průměr 2mm a jsou vyhotoveny v ose modelovaného tvaru tvárníku v místech, kde bude mít konečný



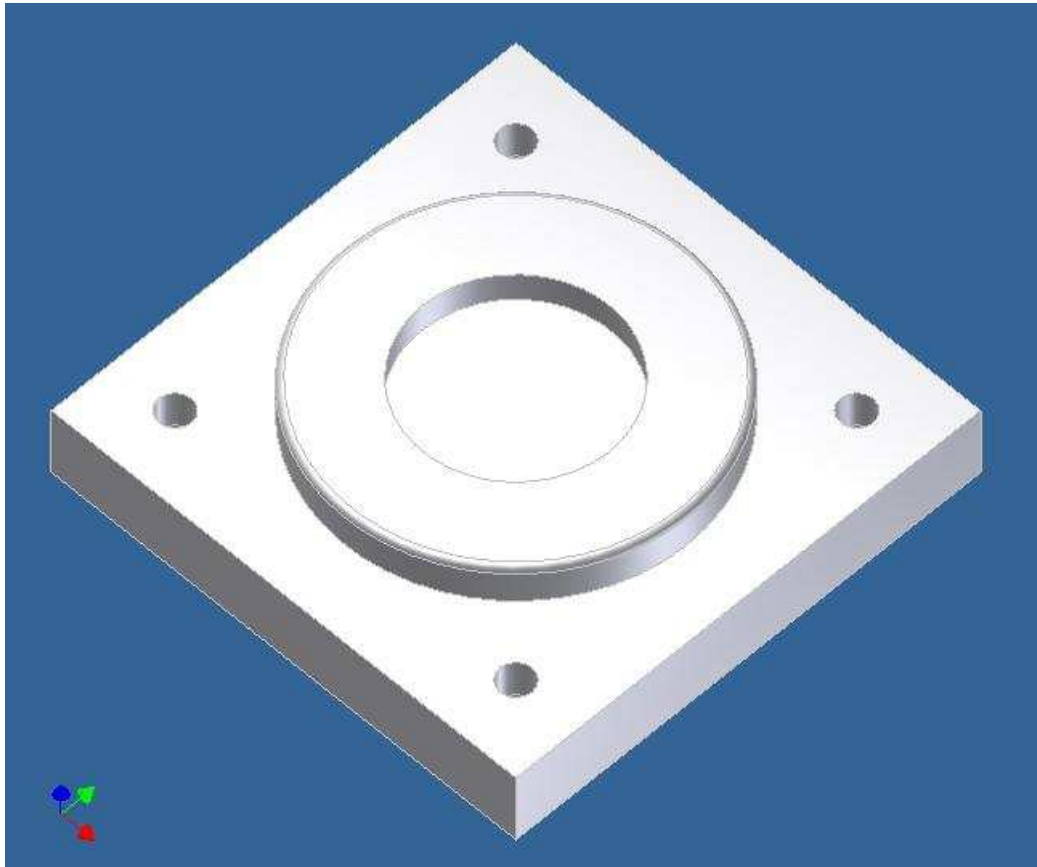
výrobek vyhotoveny otvory. Na dílu je provedeno zahlobení pro přírubu s nábojovou komorou. Tato příruba bude přimontována při sestavování šrouby. Na opačnou stranu tvárníku bude přimontována příruba s pryžovým tlumičem rázu. Pro přimontování těchto přírub jsou v dílu vyhotoveny otvory s vnitřním závitem.

K přesnému sestavení obou tvárníků jsou zde vyhotoveny aretační plochy, které tvoří zámky a zabezpečí jejich opakované přesné uložení ve stejné poloze vůči sobě. Tyto plochy jsou od dělicí roviny tvárníků zešikmeny pod úhlem  $75^\circ$  a jejich skládáním se zaručí správná poloha obou dílů tvárníku.



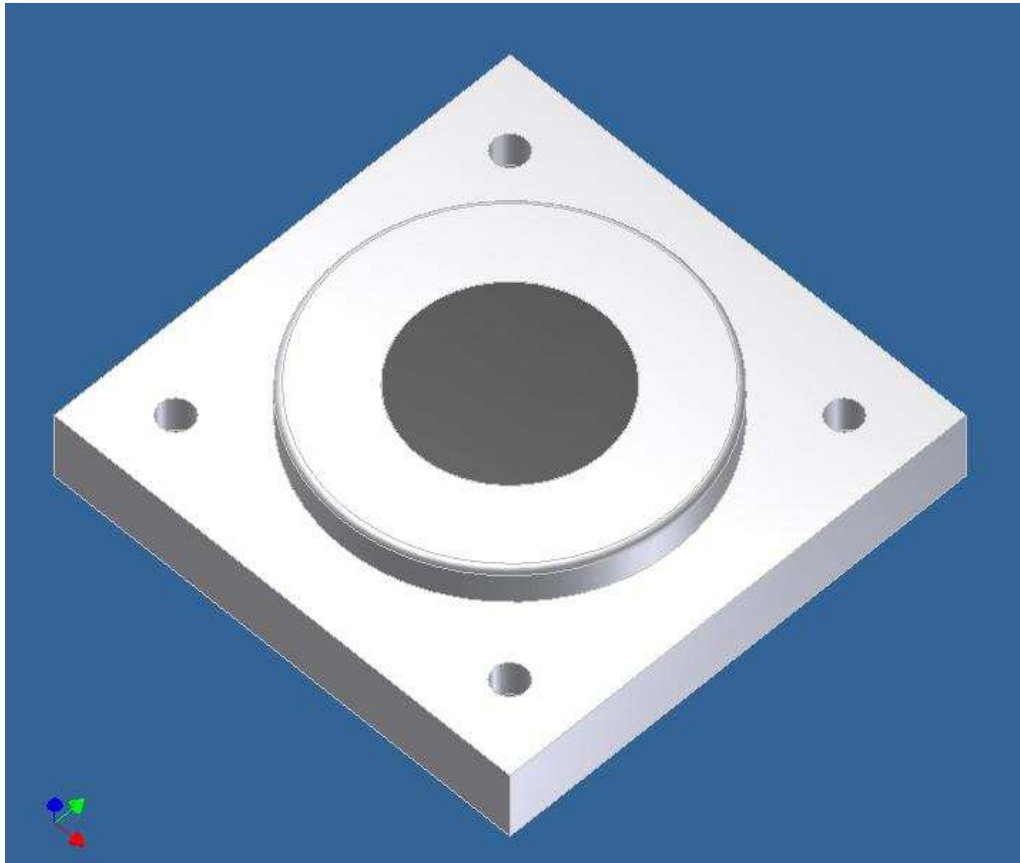
Obr. 11.4 Levý díl tvárníku nástroje

Levý díl tvárníku nástroje tvoří protikus k pravému a jejich složením tvoří úplný profil budoucího výrobku. I zde je osazení pro bezpečné usazení a opření polotovaru. Na dílu jsou vyhotoveny otvory se závity pro přimontování obou přírub. Po složení tvárníků jsou tedy na jejich čele čtyři otvory se závity. Díl je opatřen aretačními prvky s opačnými tvary, než jsou na prvním dílu tvárníku.



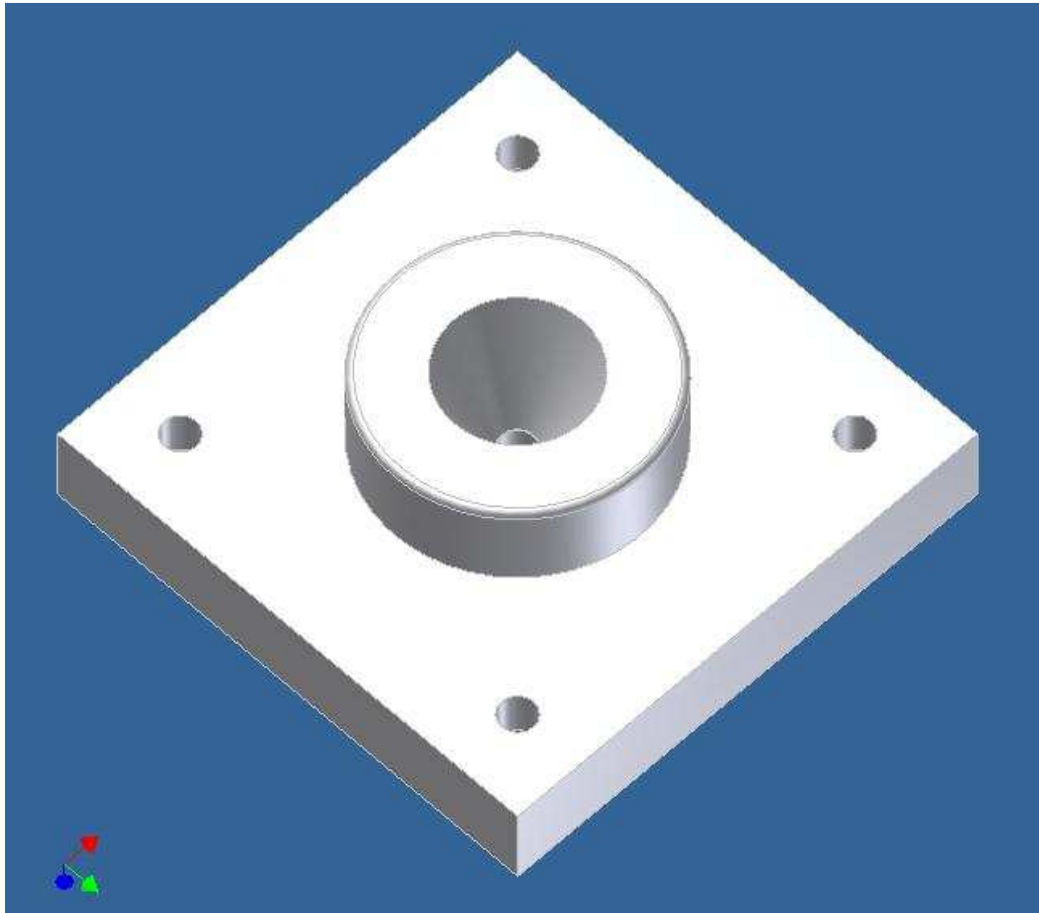
Obr. 11.5 Spodní příruba

Spodní příruba je opatřena otvory k provlečení šroubů. Dotažením příruby dojde k podélnému vyrovnání čel obou dílů tvárníků nástroje.



Obr. 11.6 Spodní příruba s tlumičem rázu

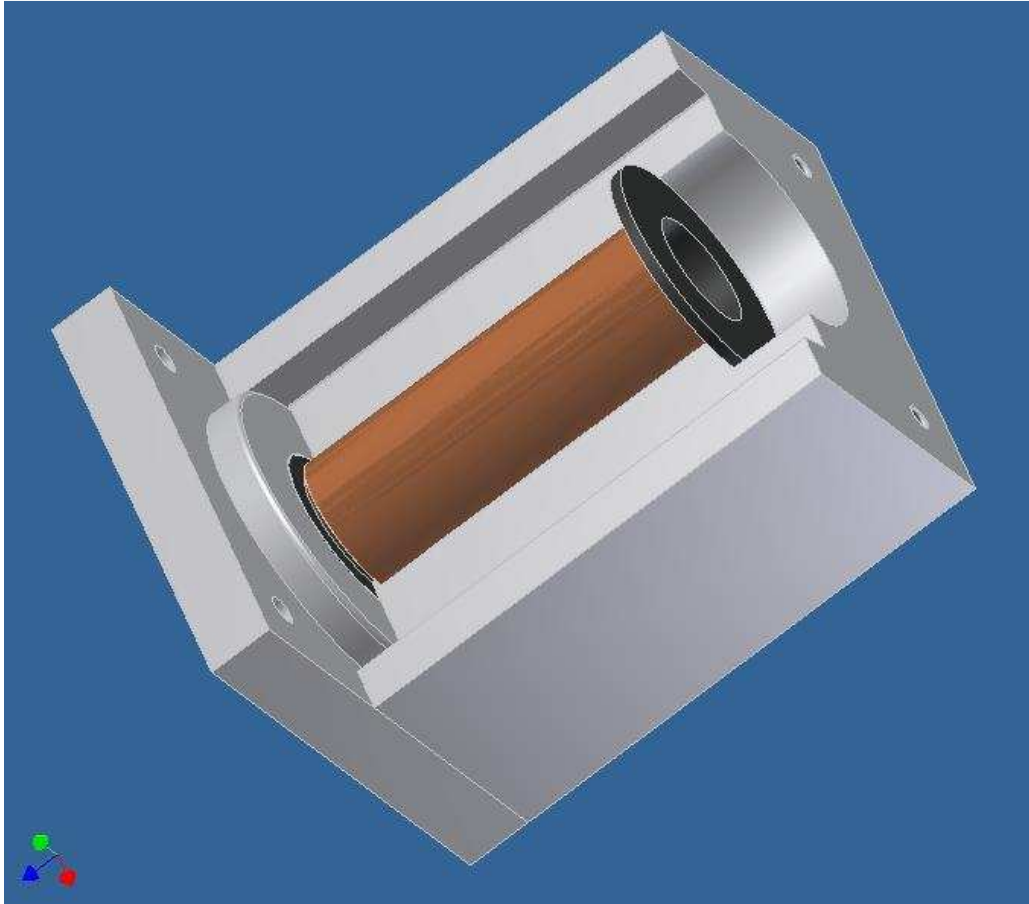
Do spodní příruby je vložena pryžová deska, vyrobená z pryžové desky vyseknutím, která má za úkol pohltit rázovou vlnu na dně pryžové vložky vložené do polotovaru. Použitím pryžového tlumiče rázu se prodlouží životnost a opakovatelnost použití pryžové vložky.



Obr. 11.7 Vrchní příruba s nábojovou komorou

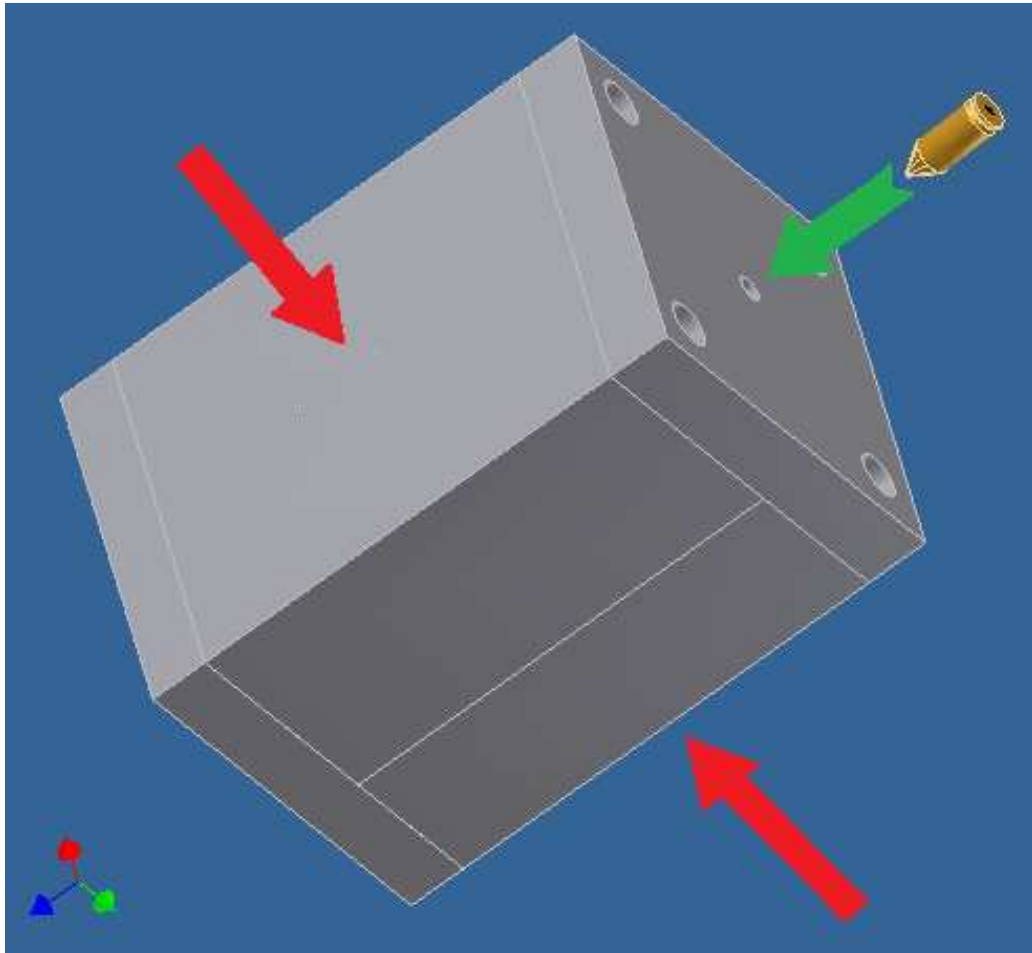
Vrchní příruba s nábojovou komorou je svou válcovou částí přimontovaná k tvářecímu nástroji a dotažena čtyřmi šrouby. Opěrnou plochou příruby dojde k vyrovnání čel tvárníků v podélném směru.

Ve válcové části příruby nábojové komory je vyhotoven komolý kužel, který se rozšiřuje od nábojové komory směrem k okrajům vnitřního průměru pryžové vložky. Tento „trychtýř“ se napojí na pryžovou vložku a opře se čelem válcové části o přírubu pryže. Tu sevře a utěsní prostor mezi vnitřním objemem pryžové vložky a nábojovou komorou. Kuzelem se při samotném tváření a hoření střeliviny bude šířit tlak směrem k hladině vody, která bude nalita v dutině pryžové vložky.



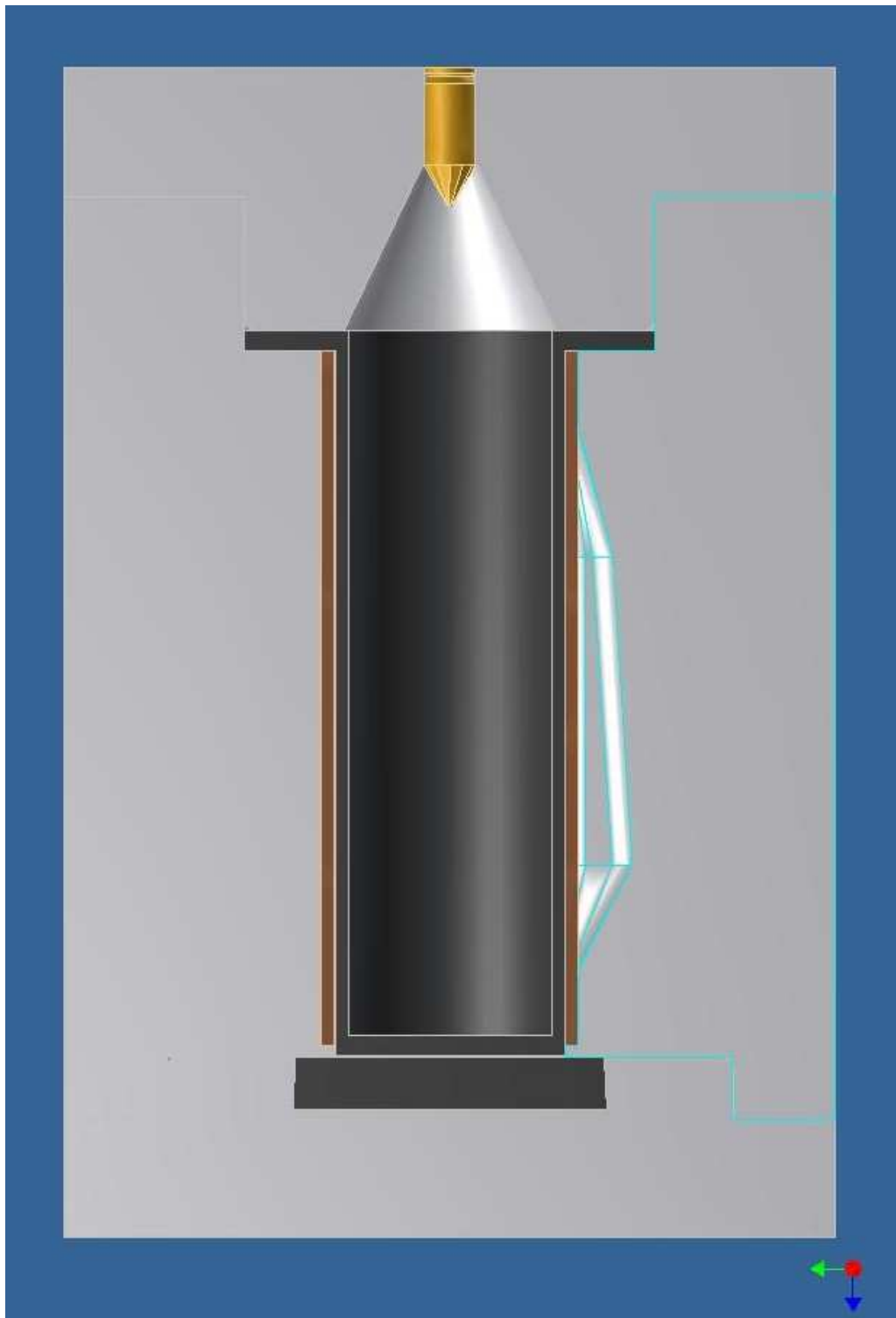
Obr. 11.8 Sestavování nástroje

Na obrázku 11.8 je znázorněno postupné sestavování nástroje před tvářením. Nejprve se přimontuje a lehce přitáhne k prvnímu dílu tvárníku spodní příruba s tlumičem rázu a do prvního dílu tvárníku se vloží polotovár z mědi. Do polotovaru se vloží pryžová vložka a přiloží se druhý díl tvárníku. Po kontrole usazení obou tvárníků nástroje vůči sobě se k nim lehkým dotažením šroubů přimontuje spodní příruba. Sestava se ustaví tak, aby spodní příruba tvořila dno sestavy a byla směrem kolmo k zemi. Do dutiny pryžové vložky se nalije voda. Následně se nasadí příruba s nábojovou komorou, přimontuje a dotáhne šrouby. Proběhne vizuální kontrola usazení dílů forem vůči sobě.



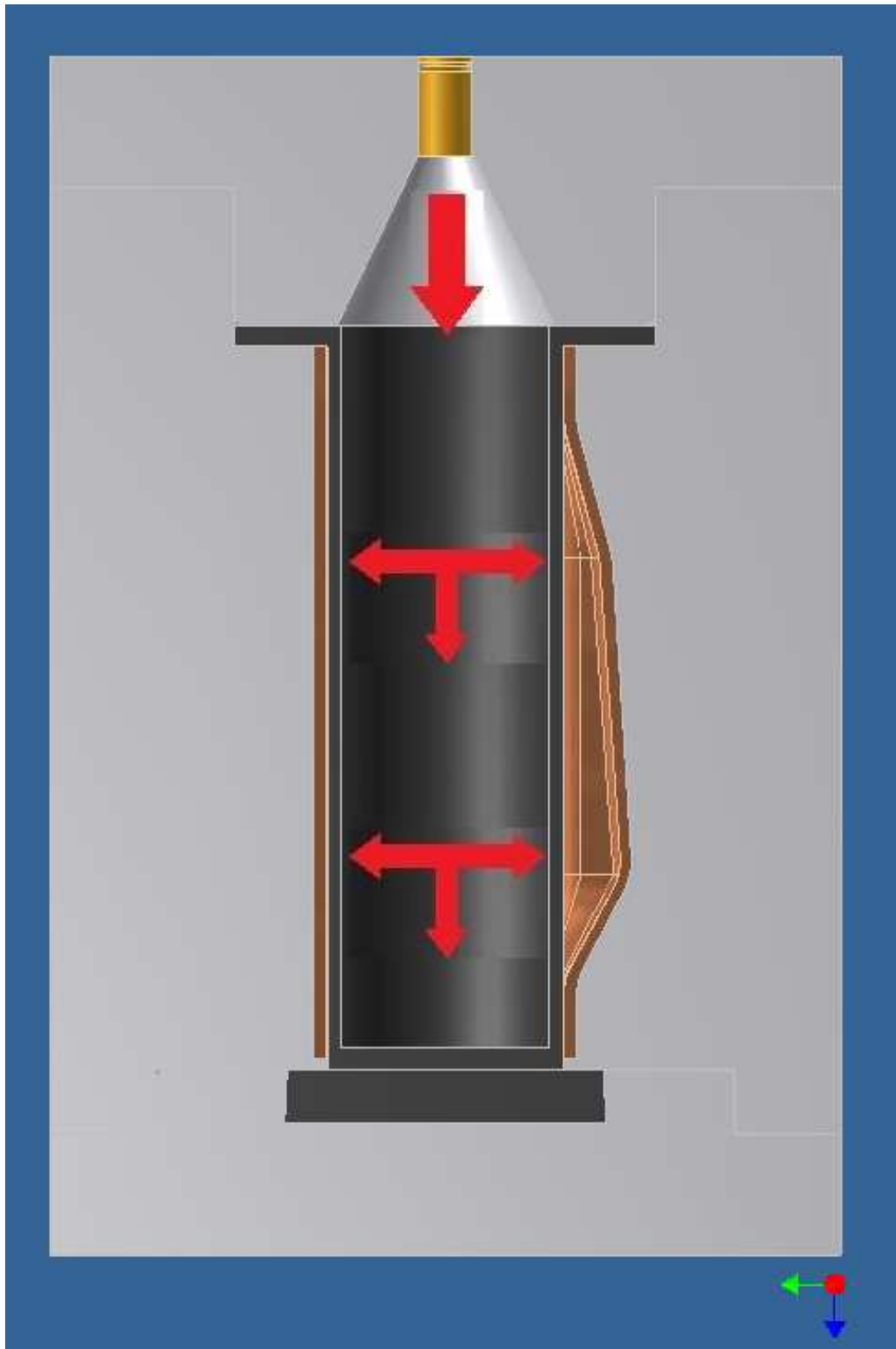
Obr. 11.9 Sestava nástroje pro tváření výbuchem

Sestavený nástroj se vloží do čelistí a sevře se silou tak, aby dělicí rovina prvního a druhého dílu tvárníku byla kolmá k těmto silám. Směr síl sevření je na obrázku 11.9 znázorněn červeně. Do vrchní příruby s nábojovou komorou se vloží cvičný akustický náboj 9mm. Směr a místo pro vložení náboje je znázorněn zeleně.



Obr. 11.10 Řez sestavou nástroje s polotovarem

Na obrázku 11.10 je znázorněn řez sestaveným nástrojem před tvářecí operací. Řez je veden kolmo k dělicí rovině prvního a druhého dílu tvárníků. Vymodelovaná dutina pro tvarování polotovaru tlakem rázové vlny v prvním dílu tvárníku je znázorněna světle modře.



Obr. 11.11 Řez sestavou nástroje s výrobkem

Stav soustavy po provedené tvářecí operaci pomocí výbuchu střeliviny je zobrazen na obrázku 11.11. Výrobek, jehož tvar se vytvářel dle vymodelovaného tvaru tvárníku, je vyobrazen hnědě. Tento stav nastal po iniciaci cvičného náboje v nábojové komoře.



Iniciační zařízení není součástí této soustavy. Zápalka zažehne prachovou náplň, ta vzplane a začne hořet a po překonání tlaku tzv. výtahové (výtlačné) síly uvnitř nábojnice dojde k otevření zaškrčení náboje [5]. Po rozevření zaškrceného ústí náboje se šíří tlak hořící střeliviny do prostoru komolého kužele. Tento objem je dutý a obsahuje kyslík. Po okysličení hořící střeliviny dochází k expandování plynu a nárůstu tlaku. Energie hořícího a expandujícího plynu je předána objemu vodní náplně uvnitř pryžové vložky a ta takřka okamžitě v celém svém objemu předá sílu tlaku v podobě rázové vlny do stěn pryžové vložky. Přes vložku je předána tlaková energie polotovaru a ta začne touto energií tvarovat polotovar. Po odstranění deformační síly, poklesu tlaku, se pryžová vložka rychle vrací do původního stavu a nabývá původní rozměry.

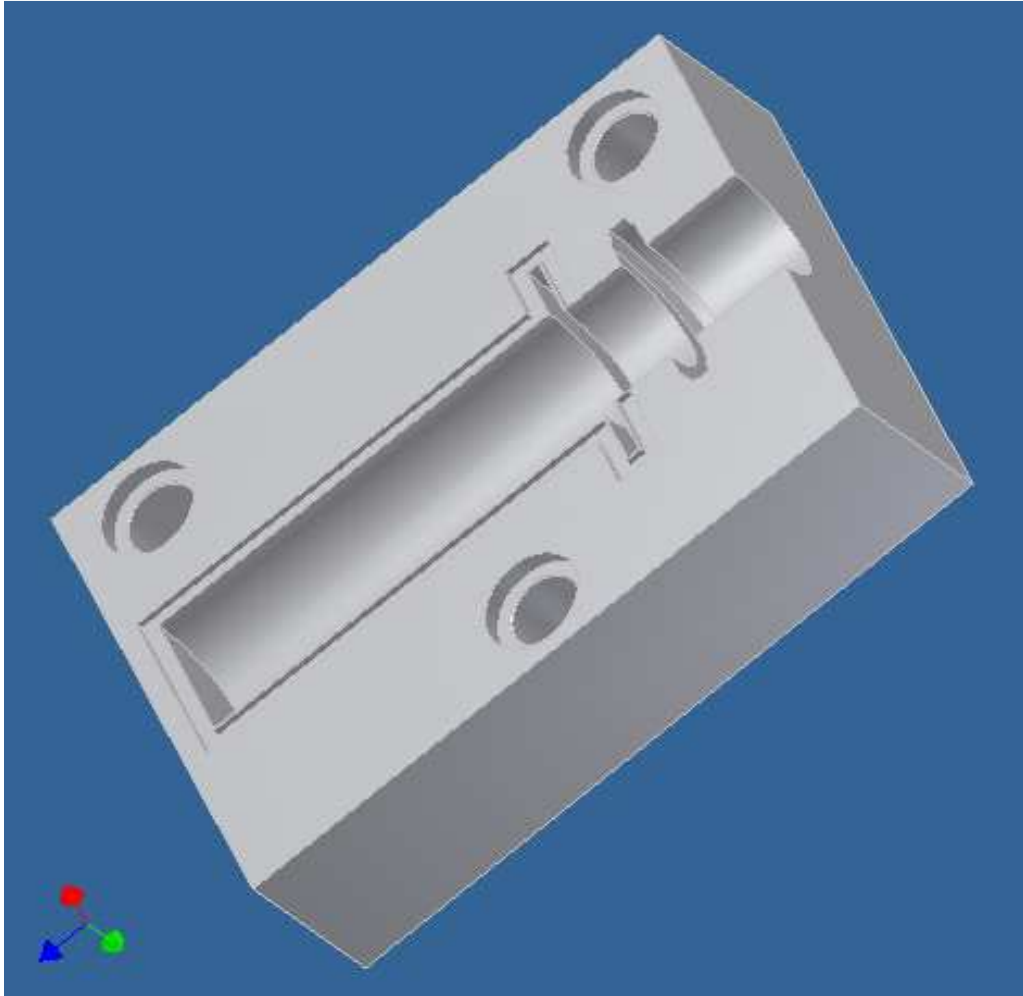
Červeně je znázorněn postup rázové vlny od nábojnice komolým kuželem a prostorem v objemu pryžové vložky. Konstrukce nástroje s použitím vodní náplně v soustavě určuje, aby v sestavě příruba s nábojovou komorou představovala víko sestavy.

## 11.5 Konstrukční návrh vulkanizační formy pro pryžovou vložku

K provedení tváření polotovaru do budoucího rozměru pomocí technologie tváření využívající vysoké rychlosti je nutné připravit prostředí, které snese tyto rychlosti a dokáže je dynamicky a pružně předat vnitřnímu průměru polotovaru. Na tvářecí sílu bude prostředí reagovat tvářením materiálu do povoleného prostoru, vytvořeného v nástroji dle požadovaných výstupních rozměrů a tolerancí. K tomuto přenosu byla zvolena pryžová vložka. Složení pryže se bude ovíjet od způsobu jejího namáhání. Je použita pryž na bázi NR, přírodního kaučuku.

Pryžová vložka je dutá, válcovitého tvaru s plným dnem a na vrchní části bude osazení, které poté zajistí bezpečné usazení ve tvářecím nástroji pro výrobek. Tloušťka stěny vložky je 2,5mm. Vulkanizační forma pro výrobu pryžového výrobku se bude skládat ze tří hlavních demontovatelných částí:

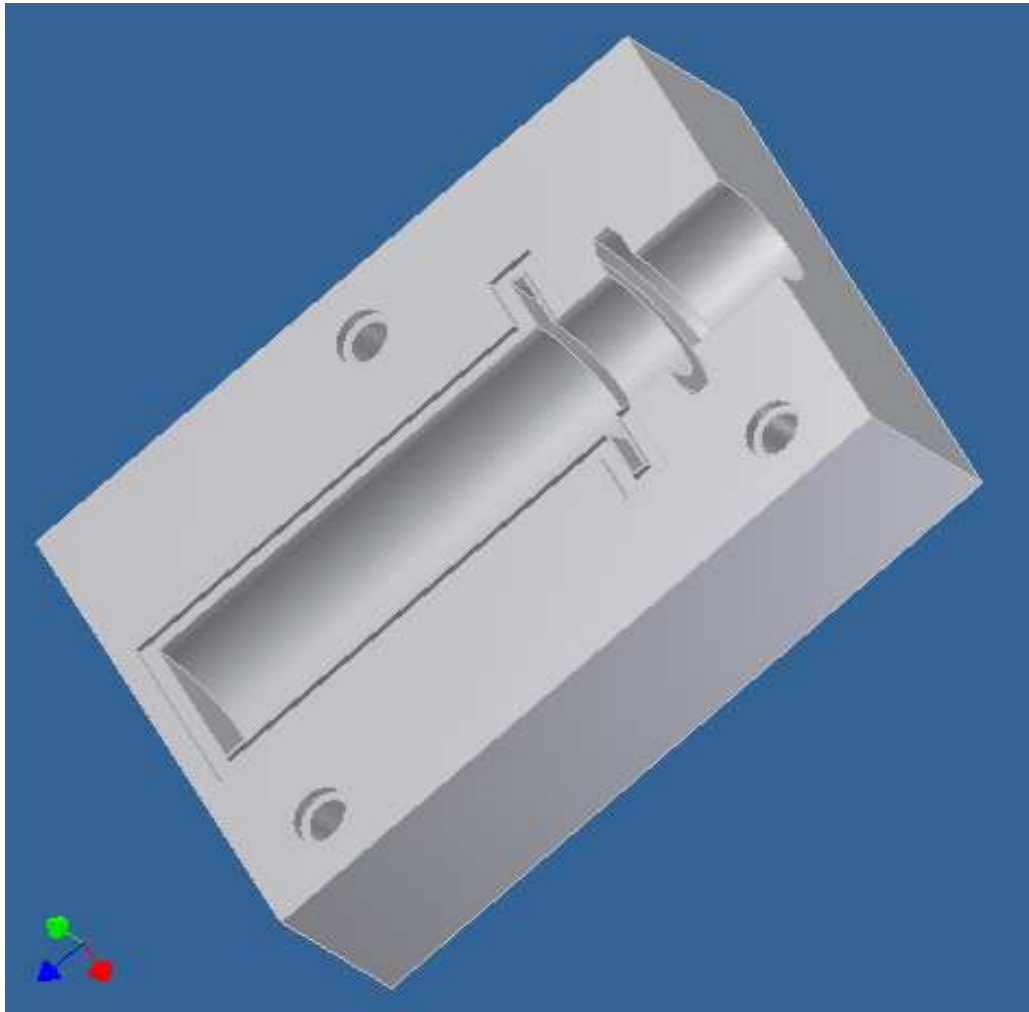
- spodní díl formy obr. 11.12,
- vrchní díl formy obr. 11.13
- a trnu (jádra) obr. 11.14.



Obr. 11.12 Spodní díl formy pro vyhotovení pryžové vložky

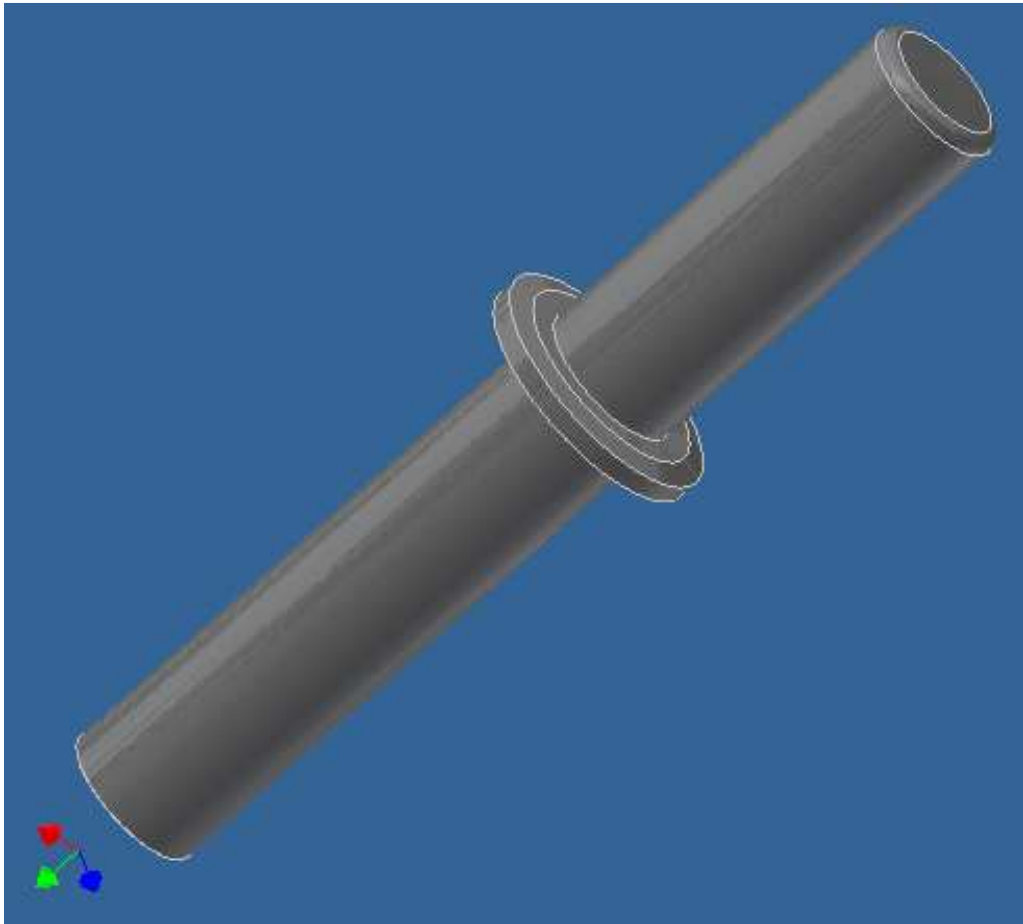
Ve spodním dílu formy na obrázku 11.12 je vyhotoven 50%ní průřez budoucího pryžového výrobku. Okolo jeho předpokládaného vyhotovení jsou vyrobeny přetokové drážky, do kterých přeteče přebytečná směs z kaučuku při uzavírání vrchní a spodní formy po jejím sevření ve vulkanizačním lise. Je zde použito konstrukční řešení, aretační zářez, pro jednoznačné umístění trnu (jádra), který tvoří vnitřní průměr pryžové vložky. Tento zářez po vložení trnu do formy a stlačení obou dílů ve vulkanizačním lise tvoří také aretační prvek, který zabrání podélnému i příčnému posunu forem a zabezpečí opakovatelné usazení a fixaci forem vůči sobě ve stejné poloze. Přesná vzájemná poloha částí forem vůči sobě je důležitá zejména pro zajištění vnějšího válcového povrchu pryžové vložky. Vnitřní tvar vložky je vytvořen nedělitelným průměrem trnu a vnější tvar určují formy, v níž je tvar rozdělen přesně na poloviny. Vychýlení forem vůči sobě má za následek vyosení polovin vnějšího tvaru, nesymetrické vytvoření pryžové vložky podle tohoto tvaru a výrobek bude zmetek. To může mít při použití zmetkovité vložky pro

tváření výbuchem za následek destrukci vložky anebo neúplné vytvarování budoucího výrobku z mědi. Konstrukční řešení využívá pro určení vzájemné polohy soustavy vodící čep a pouzdro. Vodící čepy mají primárně funkci aretovat formy vůči sobě ve stejné poloze při jejich opětovném složení.



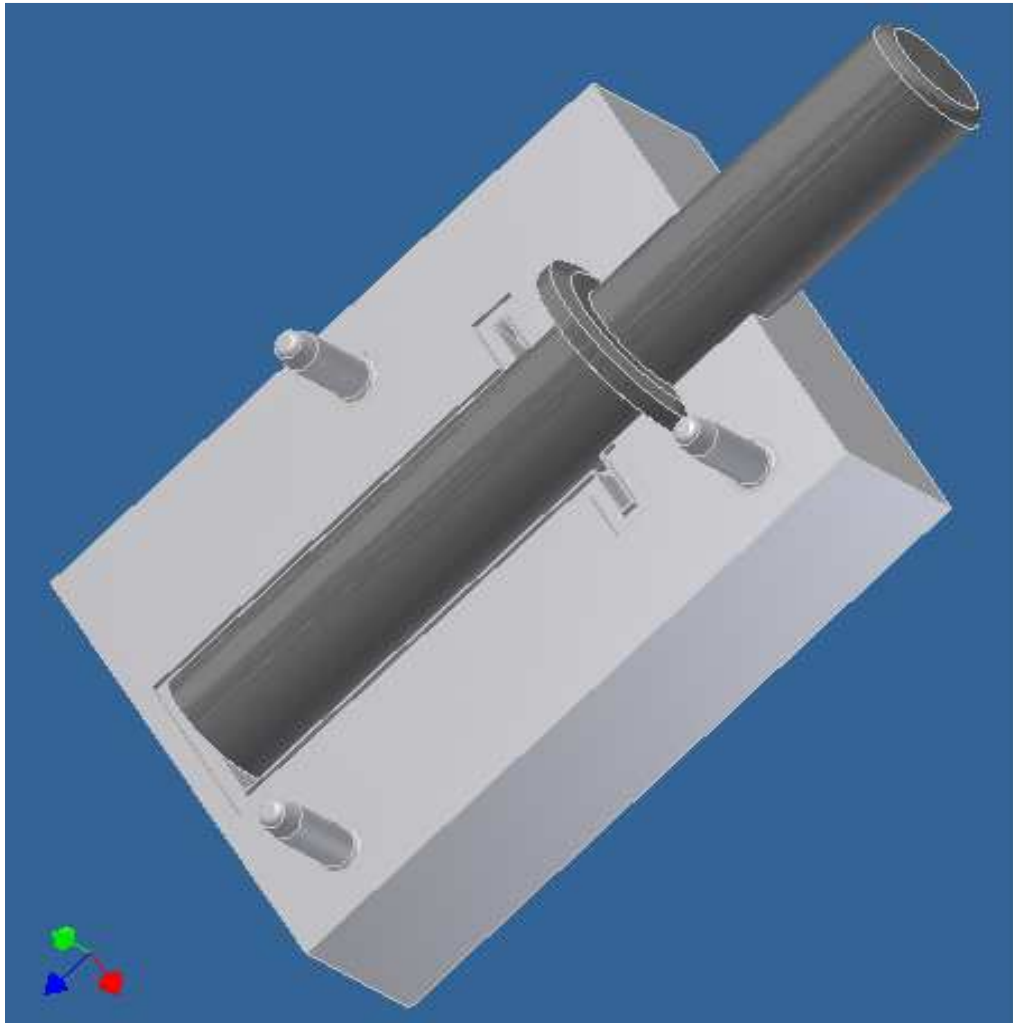
Obr. 11.13 Vrchní díl formy pro vyhotovení pryžové vložky

Vrchní díl formy na obrázku 11.13 má vyhotovenou druhou polovinu budoucího tvaru pryžové vložky a také má okolo ní přetokovou drážku pro přebytečnou kaučukovou směs [8]. Ve vrchní části jsou zajištěny vodící čepy, pro zajištění poloh forem. Pouzdra pro čepy jsou zajištěny ve spodní formě.



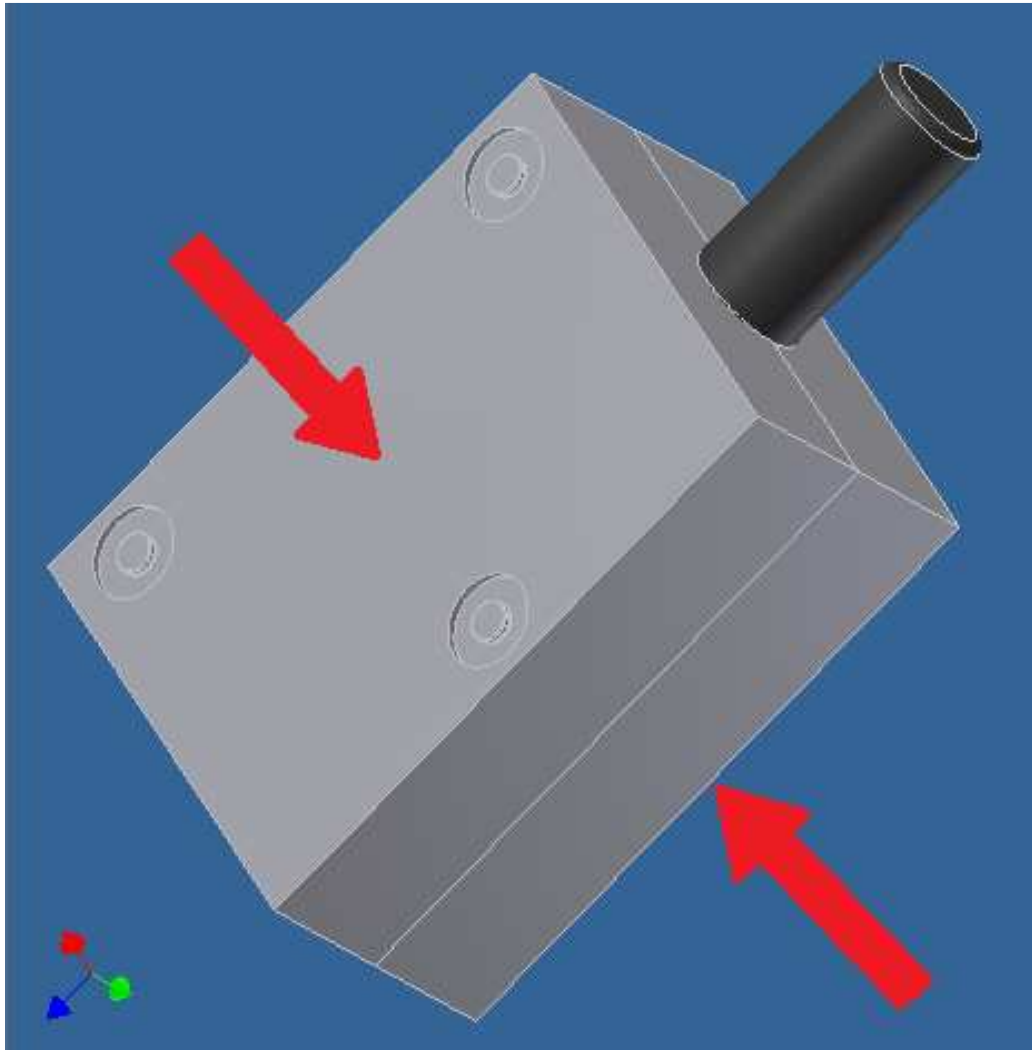
Obr. 11.14 Trn (jádro) do formy pro pryžový výrobek

Trn slouží primárně k určení vnitřního rozměru pryžové vložky. Její další důležitou funkcí je zafixování přesných poloh obou forem vůči sobě. Toto vyrovnání zabezpečí na trnu jeho prstenec a jeho přesný tvar vytvořený v obou formách. Kromě pracovního průměru, který je určen pro vyhotovení vložky a aretačního prstence, je trn složen dále i z úchopové části, která usnadňuje manipulaci s trnem při jeho uložení do formy.



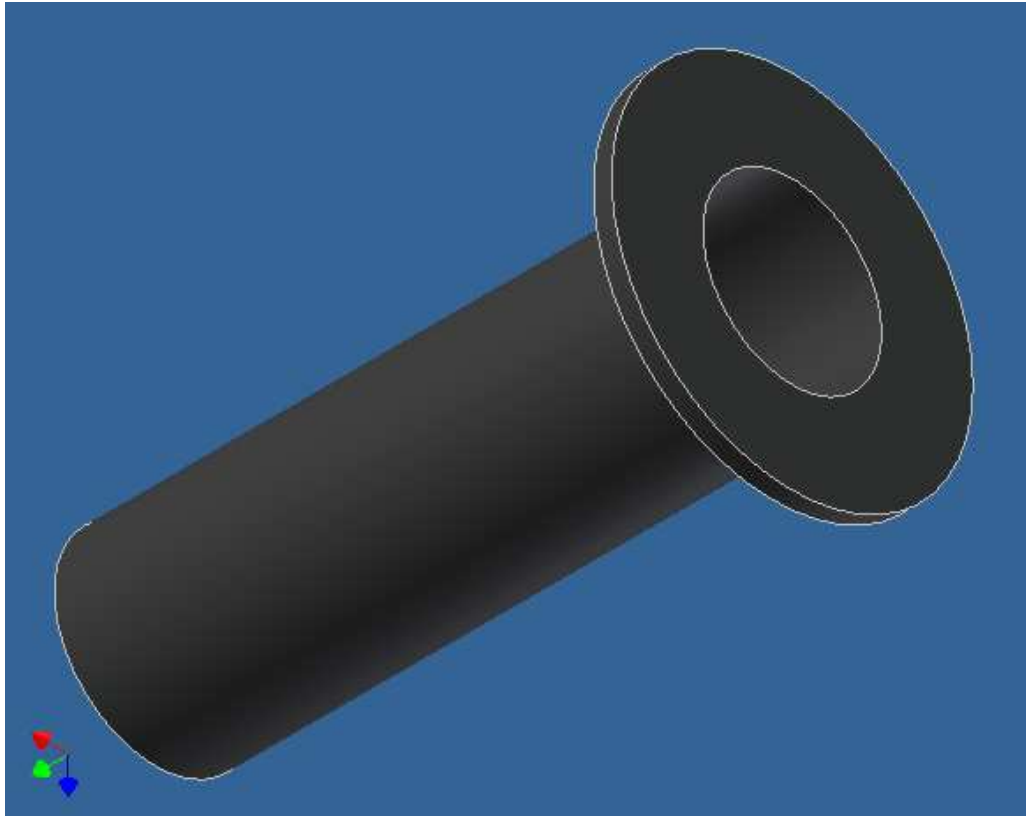
Obr. 11.15 Vrchní díl formy s trněm a vodícími čepy

Vazba vrchní formy a trnu, který je přesně uložen a tvoří dutinu pryžového výrobku.



Obr. 11.16 Sestava formy na výrobu pryžové vložky

Forma je po vložení předem připravené kaučukové směsi sestavena a poté je sevřena ve vulkanizačním lise pro zajištění vulkanizačních podmínek. Směr sevření a působení síly ve vulkanizačním lise je znázorněn červeně.



Obr. 11.17 Vložka z pryže

Vyhotovená vložka z pryže je vložena do polotovaru ze slitiny mědi, kde má za úkol přenést zatížení při tváření a chránit vnitřní povrch výrobku.

## 12 KONTROLNÍ PEVNOSTNÍ VÝPOČET

Nástroj, při tváření pomocí technologie využívající pro provedení operace energie výbuchu pracuje s vysokými tlaky, které působí na jeho konstrukci. Pro zabezpečení celistvosti formy a zabránění její destrukce při tváření musí být forma dimenzována na únosnost tvářecích sil a sevřena dostatečnou svírací silou při uložení ve svíracích čelistech.

### 12.1 Pevnostní výpočet svěrné síly nástroje

Velikost svěrné síly pracovních čelistí musí být dimenzována tak, aby při sevření dílů formy nemohlo dojít, při tváření, k jejímu rozevření. Při nedostatečném sevření by to mělo v první řadě za následek ohrožení obsluhy a následně by došlo k poškození nebo destrukci výrobku a výrobě zmetku. Pro určení potřebné svěrné síly je proveden výpočet dle obecného vztahu (12.1):

$$F_S = S_s \cdot P_t \quad (12.1)$$

Kde je:  $F_S$  – svěrná síla [N],

$S_s$  – plošný obsah tvářené součásti [m<sup>2</sup>],

$P_t$  - tvářecí tlak [Pa].

Plošný obsah tvářené součásti:

Průměr tvářené součásti  $d = 50$  mm, délka součásti  $L = 135$  mm.

Tvářecí tlak použité nábojky [10]:

$$P_t = 40 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Po dosazení do vztahu (12.1):

$$F_S = 270 \text{ kN}$$

Pro navržení bezpečné hodnoty svěrné síly nástroje  $F_B$  se vynásobí hodnota  $F_S$  bezpečnostním koeficientem 1,2:

$$F_B = F_S \cdot 1,2$$

$$F_B = 324 \text{ kN}$$

Z výpočtu vyplývá, že potřebné bezpečné sevření nástroje při tvářecí operaci musí být větší nebo rovno  $F_B = 324 \text{ kN}$ .



## 12.2 Pevnostní kontrola šroubů

Nástroj je sevřen čelistmi silou  $F_B$ , která zabrání nežádoucímu rozevření dílů tvárníků nástroje. Příruby jsou na nástroj přimontovány šrouby. Tyto šrouby musí snést zatížení při tvářecí operaci, aby nedošlo k jejich utržení a ohrožení bezpečnosti obsluhy. Na nástroji jsou použity šrouby s válcovou hlavou se zapuštěným šestihranem M10. Tyto šrouby jsou namáhané na pevnost od průměru tvářené trubky.

Čelní plošný obsah tvářené součásti  $S_c$ :

$$S_c = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4}$$

$$S_c = 1,963 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Celková síla  $F_c$ :

$$F_c = S_c \cdot P_t$$

$$F_c = 78540 \text{ N}$$

Síla působící na jeden šroub  $F_s$ :

$$F_s = \frac{F_c}{4}$$

$$F_s = 19635 \text{ N}$$

Výpočet napětí ve šroubu příruby je proveden dle vztahu:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_s} \quad (12.2)$$

Hodnota průměru jádra šroubu  $d_s$  [9]:

$$d_s = 8,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Po dosazení do vztahu (12.2):

$$\sigma_s = \frac{4 \cdot F_s}{\pi \cdot d_s^2}$$

$$\sigma_s = 376 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí podle materiálu použitých šroubů pro rázovou sílu je [11]:

$$\sigma_{dov} = 560 \text{ MPa}$$

Porovnání hodnot:

$$\sigma_{dov} > \sigma_s$$

Šrouby M10 v počtu 4 ks pevnostně vyhovují.

## EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ, PŘÍNOSY

Cílem práce bylo efektivní navržení technologie, která odstraní problémy vyskytující se při používání výrobku v provozu, zapříčiněné použitou technologií výroby. Svařováním dvou dílů docházelo k účinnému spojení dvou částí, ale jak bylo uvedeno, nese s sebou technologické nedostatky a důsledky použité technologie. Materiál byl v oblasti spojení kontaminován prvky z použité technologie spojení a to mělo za následek nežádoucí vliv na přilnavost povrchové úpravy materiálu.

Při porovnání obou technologií, určených k vymodelování konečného tvaru výrobku bez vyhotovených děr, se ukazují určité rozdíly, které určují a vyzdvihují ekonomicky výhodnější způsob tváření a to technologii využívající k operaci tlak expandující střeliviny. Vyhotovení výrobku pomocí původní technologie obsahovalo využití několika sousledných technologií, které na sebe navazovali a nesly s sebou určité množství energie na jejich uskutečnění. Potřebná energie se dá vyjádřit penězi. Jestliže je potřeba k vyhotovení konečného výrobku technologie vystřihování, ohýbání, lisování, svařování, opracování, vrtání a odstranění otřepů po každé technologii, tak se tomu přirozeně rovná i čas a vynaložené finance. Pro zvolenou technologii je nutné také vyhotovení nástroje k uskutečnění každé operace. Pokud ale zvolíme technologii, která obsahuje pouze dělení materiálu na použitelný polotovár, jeho srovnání a vytváření pomocí výbuchu, čas i vynaložené finance se radikálně zredukují.

Porovnáním obou technologických cest dojdeme k výsledku, že použití výbuchu k tváření, který trvá řádově stovky setin vteřiny a cena nábojky je v rozmezí 2,50Kč až 5Kč, účelně nahradíme původní technologii a navíc eliminujeme její nedostatky.

Nový výrobek přinese další úspory:

- Snížení počtu poruch a tím oprav zařízení z důvodů poruchy uvedené součásti a náklady na opravy,
- snížení nákladů na náhradní díly,
- zvýšení provozních hodin zařízení,
- snížení zátěže pacienta.

Veškeré vyčíslení jeho přínosů není v silách autora zpracovat.

## ZÁVĚR

Diplomová práce *Tváření výbuchem* popisuje jednotlivé způsoby širokého spektra tváření materiálu. Je popsáno správné zvolení materiálu pro určitý druh tváření a jeho samotná příprava, která zahrnuje různé druhy jeho dělení, jako např. pomocí technologie řezáním a stříháním. V práci je tváření rozděleno dle charakteru požitého materiálu na plošné a objemové. Objemové tváření obsahuje způsoby zpracování materiálu válcováním, kování a protlačováním. Plošné tváření obsahuje tváření plošných materiálů stříháním a ohýbáním. V každém odvětví, které se specializuje na danou technologii, jsou uvedeny i způsoby tváření, které jsou speciální ve svém technologickém oboru.

Některé technologické cesty zpracování materiálu vyžadují dodatečné tvářecí úpravy, jako je rovnání. V kapitole tažení jsou popsány způsoby tvarování plošných materiálů běžnými i speciálními způsoby, pomocí pryží a kapalin. V neposlední době se tváření pomocí pryží poměrně rozšířilo. Důvodem je široká škála vlastností pryží, kterých se dá pro jednotlivé tvářecí procesy efektivně využít.

V nekonvenčních metodách jsou uvedeny způsoby zpracování materiálu, které nepatří mezi nejběžnější technologické tvářecí operace, jako je např. elektrohydraulické a frekvenční tváření. Patří zde i ne příliš rozšířený speciální způsob tváření pomocí vysoké rychlosti přeměny tvaru materiálu pomocí výbuchu. K tomuto druhu tváření se užívá střelivin nebo výbušnin. Tvářecí nástroje, využívající k tváření výbuštiny nebo střeliviny, jsou od sebe z pravidla na první pohled lehce rozeznatelné. Pomocí výbušnin se tvarují materiály větších rozměrů, protože se značí vyšší energetickou hodnotou výbušné přeměny. Střelivin se z pravidla užívá v uzavřených systémech, např. k urychlení projektilu rychlostí až  $1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Protože se v odvětví tváření obecně velmi často používá pryží, je v práci pojednáno o jejich podrobném složení a vlastnostech.

Praktická část pojednává o účelném vyřešení technologického problému nahrazením technologií výroby. Je popsána původní technologická cesta výroby výrobku, jehož konečné použití v provozu bylo ovlivněno nedostatky, které nese zvolená technologie. Protože jde o součástku používanou v lékařském přístroji, který je úzce spojen s lidským organismem, je žádoucí, aby technologie výroby součástky neovlivňovala poruchovost a provoz celého přístroje. Technologie tváření výbuchem pomocí střeliviny, která byla navržena a vybrána, účelně odstraňuje a eliminuje nedostatky původní technologie. Pro tuto technologii byl navržen tvářecí nástroj s výrobní dokumentací, ve

kterém proběhne samotný děj tváření. Nedílnou součástí nástroje je i pryžový prvek, pro který je navržena forma s výrobní dokumentací k jeho vyhotovení. Pryžový prvek v soustavě nástroje chrání vnitřní povrch tvářeného materiálu před nežádoucími účinky expandující stříliviny a přenáší na materiál působící rázovou vlnu.

V závěru práce je výpočtem určena svírací síla nástroje potřebná k bezpečnému sevření formy při tváření. Je proveden i bezpečnostní pevnostní výpočet použitých konstrukčních prvků nástroje, který pracuje s tlaky, které dosahují hodnot až 40MPa.

Princip použité technologie je omezen vlastnostmi samotného děje tváření, kdy se při operaci pracuje s vysokými tlaky. Tomuto musí být přizpůsobeno i pracovní prostředí bezpečnostními opatřeními, aby se zajistila bezpečnost pracovní obsluhy.

Práce poukazuje na variabilitu použití a zvolení technologie tváření a technologických způsobů výroby. Stejných výsledků tváření a dosažení konečných tvarů výrobku se dá dosáhnout pomocí různých technologických cest. Pakliže se ale zadavatel bude ohlížet na výši nákladů k vyhotovení výrobku, problémy svazující se s použitou technologií a obtížností vytvoření konečného tvaru, pak musí zvolit alternativu, která bude cenově i časově vyvážená a splní požadavky užívání budoucího výrobku. Žádná technologie není špatná a má své právoplatné místo ve strojírenském a výrobním odvětví, ale budeme-li při výrobě hledět na jednotku cena/čas/kvalita, tak se jeví jako špatné pouze nesprávné zvolení technologie k uskutečnění výroby.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] LENFELD, Petr., *Technologie II*, 1. část, (*Tváření kovů*): Technická univerzita Liberec, 2009, 110s.
- [2] LIDMILA, Zdeněk., *Teorie a technologie tváření I*: Universita obrany Brno, 2008, 105s.
- [3] HRUBÝ, Jiří a spol., *Strojírenské tváření*: 2. vydání, VŠB – Technická universita Ostrava, 2006, 160 s.
- [4] PEŠL, Josef., *Tváření výbuchem*: Státní vědecká knihovna v Ostravě, 1963, 120s.
- [5] BEER, Stanislav a spol., *Vnitřní balistika loveckých, sportovních a obranných zbraní*: VŠB – Technická universita Ostrava, 2006, 118s.
- [6] CEJPKOVÁ, Libuše., *Diplomová Práce - Vliv MW ohřevu gumárenské směsi na fyzikální a chemické vlastnosti vulkanizátu*: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2012, 90s.
- [7] DVOŘÁK, Zdeněk., *Zpracovatelské procesy gumárenské*: Univerzita Tomáš Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2011, 130s.
- [8] DVOŘÁK, Zdeněk., *Základy výrobních procesů*: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2007, 62s.
- [9] VÁVRA, Pavel a kol., *Strojnické tabulky*: Nakladatelství technické literatury, Praha, 1983, 671s.
- [10] SELLIER & BELLOT, *Nábojky se středovým zápalem*, Dostupný z WWW: <http://www.sellier-bellot.cz/cesky/naboje-se-stredovym-zapalem.php> (cit. květen 2012)
- [11] K21, *Výrobce spojovacích materiálů*, Dostupný z WWW: <http://www.k21.cz/home.php> (cit. květen 2012)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

V přehledu jsou uvedeny jen nejdůležitější použité označení. Zbytek je uveden přímo v textu.

$T_{TAV}$	absolutní hodnota tavení materiálu [°C],
$\sigma$	napětí [MPa],
$E$	modul pružnosti v tahu [MPa],
$\varepsilon$	poměrná deformace [-],
$G$	váha trhaviny [kg],
$U$	celková kritická energie [J],
$W$	energetický ekvivalent použité výbušniny [J/kg],
$\alpha$	úhel využití energie výbušniny [%],
$\mu$	účinnost vlastního výbuchového procesu [%],
$U_{kr}$	kritická měrná energie [J],
$v_{kr}^2$	kritická rychlost rázu tvářeného materiálu [m.s <sup>-1</sup> ],
$\rho$	hustota [kg.m <sup>-3</sup> ],
$f$	koeficient (součinitel) tření [-],
$R_p$	mez kluzu [MPa],
$F_S$	svěrná síla [N],
$S_s$	plošný obsah tvářené součásti [m <sup>2</sup> ],
$P_t$	tvářecí tlak [Pa].
$F_B$	bezpečná svěrná síla [N],
$S_c$	čelní plošný obsah součásti [m <sup>2</sup> ],
$F_c$	celková síla [N],
$F_{\xi}$	síla působící na jeden šroub [N],
$d_{\xi}$	průměru jádra šroubu [mm],
$d_s$	průměr součásti [mm],
$\sigma_{\xi}$	napětí ve šroubu příruby [MPa],
$\sigma_{dov}$	dovolené napětí [MPa].

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1.1 Základní typy krystalových mřížek [2] .....	13
Obr. 1.2 Diagram z tahové zkoušky nízkouhlíkové oceli [2] .....	14
Obr. 1.3 Změna tvaru zrn v důsledku tváření [1].....	16
Obr. 2.1 Schéma linek na podélné (nahore) a příčné dělení stříháním (dole) [1].....	20
Obr. 3.1 Princip podélného (vlevo), příčného a kosého válcování [1] .....	21
Obr. 3.2 Princip kosého válcování trubek – Mannesmannův způsob, Stiefelův způsob.....	23
Obr. 3.3 Válcování kuličkových polotovarů [1] .....	24
Obr. 3.4 Tvary kovadel [1] .....	26
Obr. 3.5 Kování protlačováním za tepla [1] .....	27
Obr. 3.6 Technologie výroby trubek protlačováním [1].....	29
Obr. 4.1 Princip stříhání pomocí stříhadla [1] .....	30
Obr. 5.1 Rovnání výlisku tlakem mezi rovnými deskami [1].....	32
Obr. 6.1 Tažení metodou Marform [1] .....	34
Obr. 7.1 Výlisek přepravního sudu tváření technologií pomocí výbuchu [4] .....	36
Obr. 7.2 Jednoduché tažení na jednu operaci: 1 - nádoba, 2 - rozbuška, 3 - nálož.....	37
Obr. 7.3 Tvarování trubky pomocí střelivin [4].....	41
Obr. 7.4 Tváření pomocí střelivin prostřednictvím kapaliny a pístu [4] .....	42
Obr. 7.5 Tváření kotlového dna výbuchem [4].....	42
Obr. 11.1 Vstupní polotovar ze slitiny mědi.....	53
Obr. 11.2 Tvar výrobku po tváření výbuchem.....	54
Obr. 11.3 Pravý díl tvárníku nástroje s vymodelovaným tvarem výrobku.....	56
Obr. 11.4 Levý díl tvárníku nástroje.....	57
Obr. 11.5 Spodní příruba .....	58
Obr. 11.6 Spodní příruba s tlumičem rázu.....	59
Obr. 11.7 Vrchní příruba s nábojovou komorou.....	60
Obr. 11.8 Sestavování nástroje .....	61
Obr. 11.9 Sestava nástroje pro tváření výbuchem .....	62
Obr. 11.10 Řez sestavou nástroje s polotovarem.....	63
Obr. 11.11 Řez sestavou nástroje s výrobkem.....	64
Obr. 11.12 Spodní díl formy pro vyhotovení pryžové vložky.....	66
Obr. 11.13 Vrchní díl formy pro vyhotovení pryžové vložky .....	67
Obr. 11.14 Trn (jádro) do formy pro pryžový výrobek .....	68

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 11.15 Vrchní díl formy s trnem a vodícími čepy.....	69
Obr. 11.16 Sestava formy na výrobu pryžové vložky .....	70
Obr. 11.17 Vložka z pryže .....	71



## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1 - Dílenský výkres Výrobku
- Příloha č. 2 - Dílenský výkres Sestavy nástroje, kusovník
- Příloha č. 3 - Dílenský výkres Pravého dílu nástroje
- Příloha č. 4 - Dílenský výkres Levého dílu nástroje
- Příloha č. 5 - Dílenský výkres Spodní příruby nástroje
- Příloha č. 6 - Dílenský výkres Vrchní příruby nástroje
- Příloha č. 7 - Dílenský výkres Pryžové vložky
- Příloha č. 8 - Dílenský výkres Sestavy formy, kusovník
- Příloha č. 9 - Dílenský výkres Spodního dílu formy
- Příloha č. 10 - Dílenský výkres Vrchního dílu formy
- Příloha č. 11 - Dílenský výkres Trnu
- Příloha č. 12 - Dílenský výkres Pouzdra pro vodící čep
- Příloha č. 13 - Dílenský výkres Vodícího čepu