

# Guerinova metoda tváření plechů

Michal Grunt

---

Bakalářská práce  
2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2018/2019

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal Grunt**  
Osobní číslo: **T16065**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Guerinova metoda tváření plechů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Teoretická studie na téma tváření plechů nepevnými nástroji**
- 2. Návrh univerzálního nástroje pro tváření plechů metodou Guerin**
- 3. Konstrukce a výroba nástroje pro hydraulický lis CDC 2-7 Sklostroj Turnov**

Rozsah bakalářské práce: **cca 60 stran**  
Rozsah příloh:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- **ČADA, Radek.** *Technologie tváření a slévání* . Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010, 78 s. ISBN 978-80-248-2273-0. Dostupné také z: [http://toc.nkp.cz/NKC/201010/contents/nkc20102119480\\_1.pdf](http://toc.nkp.cz/NKC/201010/contents/nkc20102119480_1.pdf)
- **BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS.** *Výrobní inženýrství a technologie* . Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173 s. ISBN 978-80-7454-471-2.
- **ALTAN, Taylan. a A. Erman. TEKKAYA.** *Sheet metal forming: process and applications* . Materials Park, Ohio: ASM International, 2012, 1 online zdroj (xiii, 365 p.). ISBN 9781615039883. Dostupné také z: [http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSMFPA001/sheet\\_metal\\_forming...processes\\_and\\_applic](http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSMFPA001/sheet_metal_forming...processes_and_applic)

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství  
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**

Ve Zlíně dne 14. února 2019

L.S.

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

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

Příjmení a jméno: GRUNT MICHAL.....

Obor: T.2.....

## 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 užít 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 2.5.2019.....

<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, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<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, § 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 užit 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**

Bakalářská práce popisuje fundamenty tváření, charakterizuje nepevné prostředí jako druh nástroje. Zaměřuje se na vybrané nekonvenční metody tváření tenkých plechů za použití nepevného nástroje. Nastiňuje popis samotných procesů, jejich přednosti a aplikace. Jsou posouzeny technologické a konstrukční zásady tváření plechů metodou Guerin. Cílem bylo navrhnout, vyrobit a odzkoušet tvářecí zařízení pro metodu Guerin, tak aby bylo použitelné na hydraulickém lisu v laboratořích ÚVI. Funkčnost nástroje, který se skládá z pevné a nepevné části, byla prověřena na navrženém experimentu, který se zabýval odpružením plechů při ohýbání. K sestavení 3D sestavy nástroje bylo využito CAD softwaru SolidEdge ST9. V softwaru NX 12 bylo naprogramováno obrábění pevné tvářecí části nástroje.

Klíčová slova: Nekonvenční metody tváření, pryž, tváření nepevným prostředím, Guerin.

## **ABSTRACT**

My bachelor's thesis describes fundamentals of forming. It gives overview of non-rigid medium features which enables its usage as a tool. It is focused on description of unconventional methods of metal forming thin sheets with usages non-rigid tools. The thesis outlines a description of processes, their advantages and applications. It reviews technological and constructional principles of stamping by Guerin's method. Aim of the thesis was to design, manufacture and test a universal stamping tool utilizing Guerin's method. The device consists of a non-rigid and a rigid part. The tool has to be usable at hydraulic press in laboratories of UVI. Functionality of the tool was checked with designed experiment dealing with a spring back of sheets after bending. The 3D models of the device were designed in CAD software SolidEdge ST9. Manufacturing of the rigid part of the tool was programmed in NX 12.

Keywords: Unconventional forming processes, rubber, forming with non-rigid medium, Guerin.

Tímto děkuji svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za jeho vstřícný a ochotný přístup, trpělivost a cenné rady, které mi věnoval.

Dále děkuji panu doc. Ing. Zdeňku Dvořákovi, CSc. a paní doc. Ing. Dagmar Měřínské, Ph.D. za odborné rady ohledně problematiky zpracování pryže.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 TVÁŘENÍ.....</b>	<b>12</b>
<b>2 TVÁŘENÍ NEPEVNÝMI NÁSTROJI.....</b>	<b>14</b>
2.1 TVÁŘENÍ METODOU GUERIN.....	16
2.2 TVÁŘENÍ METODOU MARFORM .....	23
2.3 TVÁŘENÍ METODOU Verson – WHEELON.....	25
2.4 TVÁŘENÍ METODOU SAAB .....	26
2.5 TVÁŘENÍ METODOU Verson – HYDROFORM .....	27
2.6 TVÁŘENÍ METODOU MASLENNIKOV .....	28
2.7 TVÁŘENÍ HYDROMECHANICKÉ .....	30
2.7.1 Tváření hydromechanické s pevným tažníkem.....	31
2.7.2 Tváření hydromechanické s pevnou tažnicí.....	32
2.8 ZAKRUŽOVÁNÍ PLECHŮ ELASTOMERY .....	33
<b>3 NÁSTROJ PRO TVÁŘENÍ PLECHŮ METODOU GUERIN.....</b>	<b>34</b>
3.1 STAVBA ZAŘÍZENÍ PRO METODU GUERIN.....	34
3.2 ZÁSADY STRÍHÁNÍ PLECHŮ METODOU GUERIN .....	36
3.3 ZÁSADY OHÝBÁNÍ PLECHŮ METODOU GUERIN .....	37
3.4 ZÁSADY TAŽENÍ PLECHŮ METODOU GUERIN .....	40
<b>4 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI PRÁCE.....</b>	<b>42</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>43</b>
<b>5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE .....</b>	<b>44</b>
<b>6 SPECIFIKACE POUŽITÉHO HYDRAULICKÉHO LISU .....</b>	<b>45</b>
<b>7 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ UNIVERZÁLNÍHO TVÁŘECÍHO ZAŘÍZENÍ PRO METODU GUERIN.....</b>	<b>46</b>
7.1 NÁVRH NEPOHYBLIVÉ ZÁKLADOVÉ DESKY .....	46
7.2 NÁVRH POHYBLIVÉ ZÁKLADOVÉ DESKY.....	46
7.3 NÁVRH LISOVNICE.....	47
7.3.1 Výpočet velikosti tlaku a kontrola tloušťky stěny skříně.....	48
7.3.2 Výroba pryže pro výplň lisovnice .....	49
7.4 NÁVRH LISOVNÍKU .....	52
7.4.1 Tvorba CAM programu.....	53
7.5 NÁVRH LINEÁRNÍHO VEDENÍ .....	56
<b>8 VÝVOJ A VARIANTY NÁSTROJE .....</b>	<b>59</b>



8.1	VERZE PRVNÍ.....	59
8.2	VERZE DRUHÁ .....	59
8.3	VERZE TŘETÍ .....	60
<b>9</b>	<b>EXPERIMENT – VLIV SPECIÁLNÍ OHYBNICE NA ODPRUŽENÍ PLECHU .....</b>	<b>61</b>
9.1	NAMĚŘENÁ A ZPRACOVANÁ DATA .....	63
9.2	DISKUZE VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU.....	67
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>78</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>81</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>82</b>

## ÚVOD

Technologie nekonvenčního plošného tváření spočívají v použití nestandardních podmínek ke zpracování plechových dílců v požadované výrobky. Jedná se o procesy, které využívají např. nepevných nástrojů, vysokých parametrů ve formě rychlostí, teplot nebo elektrické energie.

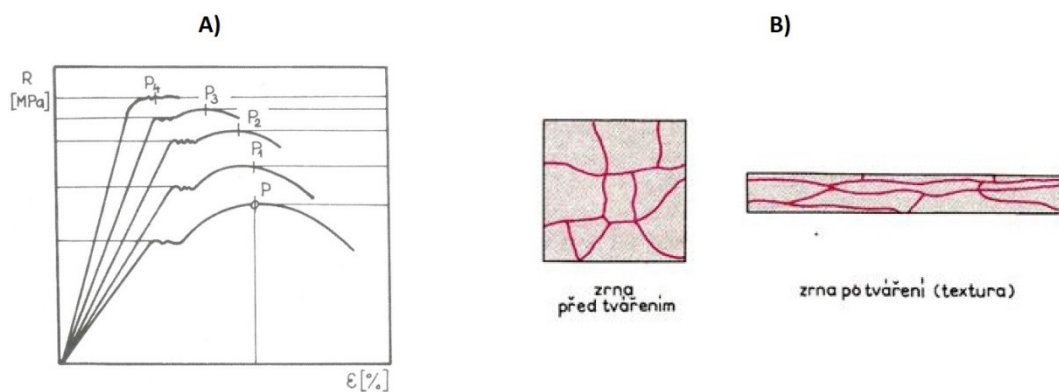
Ačkoli ve velkosériové výrobě stále dominují konvenční technologie výroby. Je možno sledovat neustálý vývoj technologií nekonvenčních. Příčinou vzniku těchto technologií je rozvoj průmyslu v mnoha rozlišných oblastech zájmu. Z ekonomického hlediska lze danou technologii vyrobit dílec za nižší náklady v porovnání s konvenčním způsobem, jelikož nástroj, případně stroj, je levnější. Může se jednat rovněž o zkrácení výrobních časů na výrobní operaci a tím docílit vyššího finančního zisku. Použitím některých z nekonvenčních metod lze získat vylisky velmi složitých tvarů, jež by byly konvenční technologií tváření stěží vyrobitelné. Rozvojem těchto procesních způsobů je ovlivněna i inženýrská oblast konstrukce, designu a dimenzování výrobků.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 TVÁŘENÍ

Tváření je technologie, při níž dochází k deformacím a změnám tvaru polotovaru ve výrobek prostřednictvím operací bez tvorby třísek a porušení soudržnosti [1].

Rozdíly mezi plošným a objemovým tvářením tkví nejen ve směrech deformací a formách resp. tvarech polotovaru, nýbrž také v teplotě tváření. Vstupním polotovarem pro technologii plošného tváření je kovový materiál ve formě přístřihu plechu. Materiál je deformován převážně ve dvou směrech, deformace ve třetím směru je zanedbatelná, tzn. tloušťka plechu se procesem nemění [17]. Technologii tváření lze rozdělit podle teploty, za které probíhá, a to na tváření za tepla a na tváření za studena. Rozhodujícím faktorem je teplota rekrystalizace zpracovávaného materiálu, při níž začíná docházet k obnově tvaru a orientace zrn. Tento proces se nazývá zotavení.



Obr. 1. A) Vliv zpevnění na mechanické vlastnosti materiálu [1], B) Vznik textury následkem tváření [2]

Ohřevem materiálu nad hodnotu teploty rekrystalizace využíváme ke snížení tvářecích sil. Toto tváření pak nazýváme tvářením za tepla. Ohřevem materiálu pod hodnotu rekrystalizace využíváme ke změně mechanických vlastností výchozího materiálu (např. meze kluzu a meze pevnosti) nebo ke změně fyzikálních vlastností a vnitřní struktury materiálu. Toto tváření pak nazýváme tvářením za studena [2]. Vlivem tváření materiálu za studena dochází i k anizotropii vlastností vlivem tvorby textury (Obr. 1 – B), tedy orientace zrn ve směru tváření. Zpevnění a anizotropie není vždy žádoucím efektem a tak je možnost po tvářením za studena použít technologický proces rekrystalizačního žíhání, jenž probíhá nad teplotou rekrystalizace a obnovuje původní strukturu materiálu a tažnost, což umožní materiál dále

tvářet. Kovy mají odlišné teploty tání i teploty rekrytalizace, jež spolu navzájem korelují. V praxi se hodnota teploty rekrytalizace určuje orientačně dle teploty tání [1].

$$T_r = (0,3 \div 0,4) \cdot T_t \quad (1)$$

kde:

- $T_r$  – teplota rekrytalizace [K]
- $T_t$  – teplota tání [K]

Při plošném tváření tenkých materiálů nedochází k pohybu velkých objemů materiálu a tak ohřev nad teplotu rekrytalizace by příliš neovlivnil velikost sil a celý proces by činil energeticky a časově náročný. Užívá se jej především při vyčerpání tažnosti materiálu.

## 2 TVÁŘENÍ NEPEVNÝMI NÁSTROJI

Technologie tváření nepevným nástrojem mají jednu část nástroje pevnou, která udává budoucímu výlisku jeho geometrii, a druhou protikusovou část nástroje nepevnou, která vybudí tvářecí sílu a potřebný tlak na přetvoření polotovaru [4].

Pro nepevnou část nástroje jsou v jednotlivých případech použity elastomery a tekutiny, případně jejich kombinace, a to pro jejich společnou schopnost téct, tvarově se přizpůsobovat a v případě kapalin a elastomerů být téměř nestlačitelný.

Nestlačitelnost ideálně elastických i hyperplastických materiálů (elastomerů) je posuzována velikostí objemového modulu pružnosti označovaným  $K$ . Poněvadž elastomery dosahují hodnot  $\nu \approx 0,5$ , pak pro tyto materiály může narůst  $K$  nade všechny meze [19].

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)} \quad (2)$$

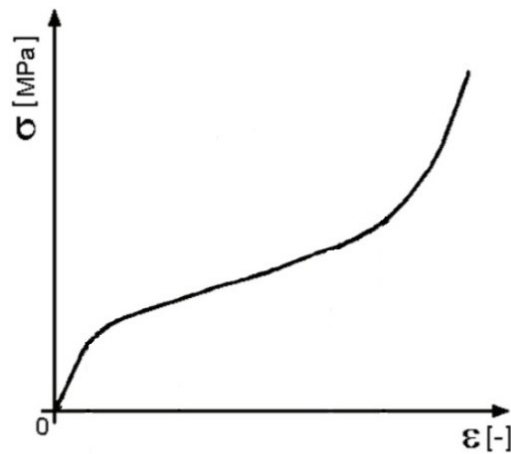
kde:

- $K$  – objemový modul pružnosti [MPa]
- $E$  – Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]
- $\nu$  – Poissonův poměr [-]

Elastomery se liší od jiných konstrukčních materiálů několika rysy, např.:

- mají velké hodnoty elastické deformace
- hodnoty tažnosti dosahují několika set procent
- k deformacím nastává účinkem malých sil

Závislost napětí na deformaci má pouze v úzkém intervalu hodnot lineární průběh (*Obr. 2*). Tato skutečnost silně ovlivňuje možnost provádět technické výpočty v rámci platnosti Hookeova zákona (při větších deformacích, kde je oblast napětí a deformace nelineární, je možno počítat dle tzv. nelineárních hyperelastických materiálových modelů).



Obr. 2. Tahová křivka elastomeru  
[24]

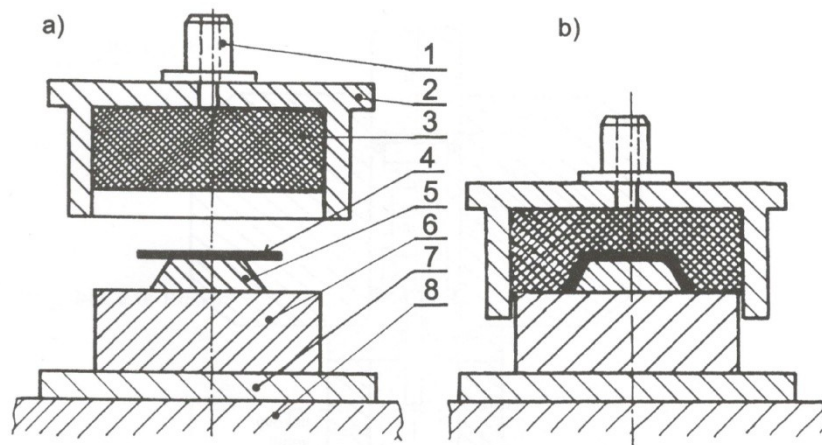
Mechanické chování elastomerů je závislé na více faktorech. Důležitou roli hraje především teplota použití. Elastomery aplikované při teplotách nižších než  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  se svými vlastnostmi, zejména tuhostí, přibližují kovovým materiálům. Při teplotách nad  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  dochází naopak k výraznému poklesu jejich tuhosti [24].

Použití kapalin jako elastického prostředí nachází své uplatnění v celé řadě metod, jež budou dále zmíněny, a to zejména z důvodu jejich obtížné stlačitelnosti. Jako médium často postačí voda, někdy jsou ovšem použity z technologických důvodů různé emulze a oleje např. ke snížení tření a otěru při tváření nebo k ohřevu obtížně tvářitelných slitin.

## 2.1 Tváření metodou Guerin

Guerinova metoda je první patentovaná nekonvenční technologie tváření plechových dílů. Vynálezcem byl Henry E. Guerin a učinil tak v roce 1935 [5].

Podstata metody spočívá v tom, že elastomer upevněný v lisovnici se pohybuje směrem k pevnému lisovníku, na kterém je uložen plechový polotovár, viz *Obr. 3*. Elastomer se začne po kontaktu s plechem postupně přetvářet a mezi těmito prvky vzniká tlak, který s narůstající hloubkou vtisku tváří součást dle geometrie tažníku do požadovaného tvaru. Tlak vyvolaný elastomerem je na celém povrchu plechu ve všech směrech prakticky téměř stejný, proto nedochází ke změně tloušťky plechu [6]. Po skončení tváření se elastomer vrátí do výchozí polohy a je možné vyjmout výrobek.



*Obr. 3. Schéma Guerinovy metody (a - před tažením, b - konec tažení, 1 – upínací trn, 2 – skříň, 3 – elastomer, 4 – přístřih plechu, 5 – tažník, 6 – ponorná deska, 7 – upínací deska, 8 – stůl lisu) [20]*

Vratná deformace elastomerů je omezená, jež souvisí i s opotřebením lisovnice, jejíž elastomerní výplň je nutno po řádově stovkách až pár tisících pracovních cyklů měnit. Pokud se nejedná o monoblok elastomeru, nýbrž vrstvy elastomerních desek, je zde možnost tyto vrstvy pouze zaměnit.

Nedostatek metody je také v delších výrobních časech, týkajících se především rychlosti samotného tváření [4]. Naproti tomu výhodou je to, že není nutné přesné zarovnání lisovníku a lisovnice, a tak jsou výrobní časy redukovány během této operace. Metoda je vhodná pro mělké tažení, ohýbání a při použití tvrdších elastomerů pro stříhání.



Výhodou je jednoduchost nástroje, snadná zaměnitelnost lisovníků a možnost použití pro různé materiály odlišných tlouštěk [8]. Touto technologií se produkují převážně prototypy a menší série výrobků. V leteckém průmyslu se tímto způsobem tváří téměř polovina všech plechových dílů [6]. Kvůli jejich široké škále tvarů a velikostí by byl konvenční nástroj neúměrně drahý. Na výrobu lisovníku je možné použít i nekovové materiály jako epoxidové pryskyřice, dřevo, plasty [7]. Za správných technologických podmínek nedojde k poškození povrchu plechu při tváření, protože se elastomer dokonale přizpůsobuje tvaru lisovníku. Případná povrchová poškození vylisku se většinou objeví nejdříve na straně pevného lisovníku.



*Obr. 4. Vylisek technologie Guerin – příčná výztuha křídla letounu [21]*

Ačkoliv jsou výrobky složitých tvarů, tak i přesto jsou ve většině případů tvářeny touto metodou na jeden tah [6]. Hloubka výtažků málokdy přesahuje 50 mm. tuto hranici lze překonat vyššími tvářecími tlaky a použitím elastomeru ve formě desek. Je třeba však mít na paměti zvyšující se riziko vzniku zvlnění a trhlin. Vady výrobků při tváření lze korigovat rychlostí tváření. Experimentálně bylo zjištěno, že užitím lisů (statickým účinkem) jsou způsobeny trhliny a zvlnění materiálu více než při použití bucharů (dynamickým účinkem) [8]. Má-li být obdržen výtažek bez zvlnění pomocí technologie, která nevyužívá přidržovačů, platí pro mezní rozměry rondelu následující vztah [22].:

$$\frac{s_p}{D_0} \cdot 100 \leq 4,5 \cdot (1 - m) = 4,5 \cdot \left(1 - \frac{D_1}{D_0}\right) \quad (3)$$

kde:

- $s_p$  – tloušťka polotovaru [mm]

- $D_0$  – průměr přístřihu [mm]
- $m$  – součinitel tažení [-]
- $D_1$  – průměr průtažníku [mm]

V případě, že vztah neplatí, jedná se o hluboký tah a je potřeba na výrobu výtažku použít nástroj s přidržovači.

Potřebný tlak pro tažení elastomerem bez použití přidržovačů lze přibližně určit dle vztahu [22]:

$$p = \sigma_{pt} \cdot \frac{s_p}{r_{\min}} \quad (4)$$

kde:

- $p$  – potřebný tlak [MPa]
- $\sigma_{pt}$  – mez pevnosti v tahu taženého materiálu [MPa]
- $s_p$  – tloušťka polotovaru [mm]
- $r_{\min}$  – nejmenší poloměr ohybu [mm]

Technologií Guerin lze běžně tvářet celou řadu železných i neželezných kovů. Ovšem v případě slitin titanu je nutností nahřát samotný plech a pevnou část nástroje, což má za následek rychlé opotřebení elastomeru. V těchto případech je vhodné zvážit použití konvenční lisovnice [4]. Velikost lisu či bucharu závisí na potřebné síle, kterou je nutné při operaci vyvodit. Ta je vyšší oproti konvenčnímu lisování z důvodu složky síly potřebné pro překonání tvarové deformace elastomeru. Síly potřebné k provedení operace jsou [18]:

$$F_C = \sum F_i = F_{tv} + F_f + F_e \quad (5)$$

kde:

- $F_C$  – celková síla [N]
- $F_{tv}$  – tvářecí síla [N]
- $F_f$  – třecí síla [N]
- $F_e$  – síla na změnu tvaru elastomeru [N]

Velikosti sil se liší na základě jednotlivých druhů tvářecích operací.

Kvalita ustřižené plochy kovu pomocí elastomeru bývá mnohdy lepší než v případě třískového obrábění (frézování, řezání), či jiným způsobem mechanického dělení materiálu, kde za pohybem nástroje nebo plechu stojí člověk. Tato technologie je v porovnání s konvenčním stříháním s pevnou střížnicí a střížníkem náročnější na nejen velikost potřebného tlaku. Za to nástroj je levnější, zvláště v případech, kdy se stříhá podél delších a složitějších hran. Je možno provádět i děrování [17]. Nejmenší možný zhotovitelný děrovaný průměr je kolem 50 mm, tento údaj je orientační a je limitován např.: mechanickými vlastnostmi děleného materiálu i elastomeru a taky jejich tloušťkou, tlakem vyvozeným při operaci, třením, rychlostí deformací atp.

Použitím této metody stříhání dojde k produkci většího množství odpadu, protože je vyžadován přesah plechu přes okraj střížníku. Jeho velikost obvykle bývá [22]:

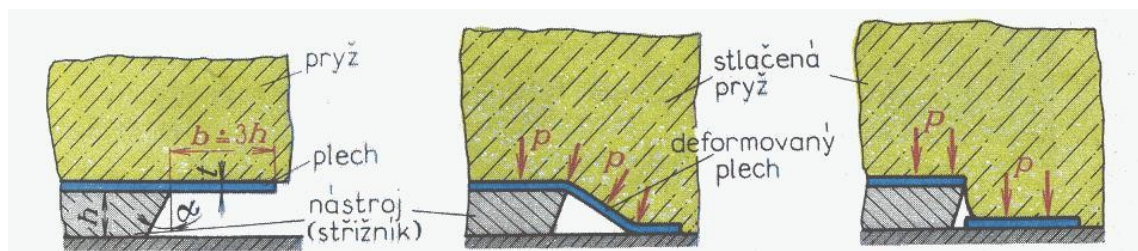
$$b \geq 3 \cdot h = 3 \cdot 10 \cdot s_p \quad (6)$$

kde:

- $b$  – přesah přes okraj střížníku [mm]
- $h$  – výška střížníku [mm]
- $s_p$  – tloušťka stříhaného polotovaru [mm]

Při výrobě více výstrižků během jednoho zdvihu je minimální vhodnou roztečí mezi nejbližšíma dvěma body střížníků 75 mm [3]. Pro co nejkvalitnější stříh by měl mít střížník co nejostřejší dělicí hranu a zkos s úhlem  $\alpha_s = 2 \div 4^\circ$  [22].

Proces se dá rozdělit do tří fází, viz *Obr. 5*. V první dojde k dosednutí elastomeru na plech a přitlačení jej k hraně střížníku. V druhé se plech tlakem elastomeru ohne přes hranu až k desce, na níž je střížník upevněn. Nakonec působením ohybového a tahového napětí je vytvořena v plechu trhlinka, jež se začne šířit a plech utrhne [18].



*Obr. 5. Průběh stříhání elastomerem [2]*

Tahové i ohybové napětí jsou normálového charakteru a tak prakticky nedochází ke stříhu materiálu, ale k jeho trhání, což souvisí s kvalitou stříhané plochy. Ohybová složka napjatosti dává potenciál k tvorbě rádiusu podél ustřižené hrany plechu, což může znemožnit v přesných aplikacích správnou funkčnost výrobku.

Pro stříhání pomocí elastomeru platí následující vztah:

$$F_C > F_s \quad (7)$$

kde:

- $F_C$  – celková pracovní síla [N]
- $F_s$  – střižná síla [N]

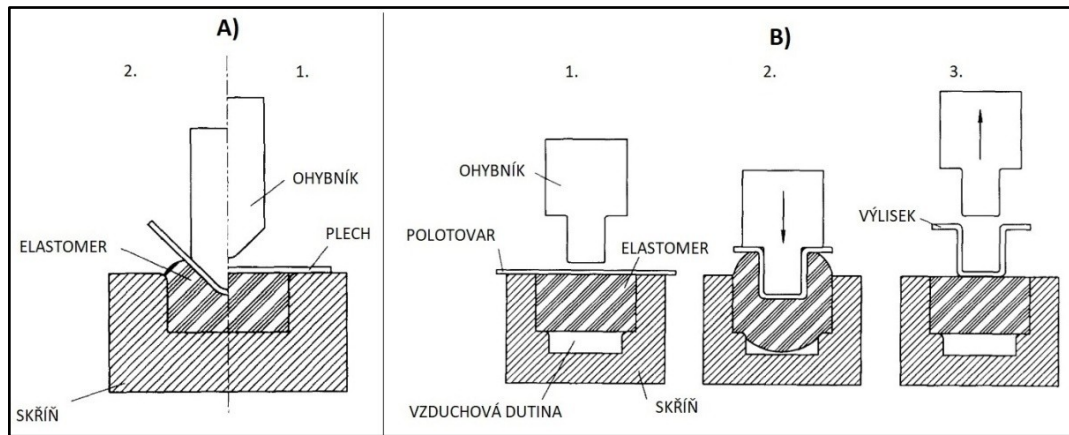
Pro operaci děrování tedy [18]:

$$F_C = p_{\text{char.}} \cdot \frac{\pi d_1^2}{4} > \pi \cdot d \cdot s \cdot \tau_{\text{Rms}} = F_s \quad (8)$$

kde:

- $p_{\text{char.}}$  – charakteristický tlak [MPa]
- $d_1$  – děrovaný průměr [mm]
- $s$  – tloušťka stříhaného plechu [mm]
- $\tau_{\text{Rms}}$  – mez pevnosti ve smyku děrovaného materiálu [MPa]

Ohýbání pomocí elastomeru má jednoznačně vyšší potenciál proti konvenčnímu. Snáze se ohýbají složitější tvary profilu než jen U a V. Navíc u těchto základních druhů ohybů bylo experimenty zjištěno, že míra odpružení materiálu v porovnání s konvenčním ohýbáním je menší. Lze vytvořit nejen vícenásobný ohyb v jedné operaci, nýbrž lze také přehýbat jako např. v *Obr. 6 - B*. To vše jen díky elastickým vlastnostem vložky nepevné ohybnice [12]. Na téměř každý druh ohybu je možné najít tvarové řešení bloku elastomeru a koncepce celé ohybnice, čímž se dají snížit požadavky na výkon stroje, ale i zvýšit životnost elastomeru.



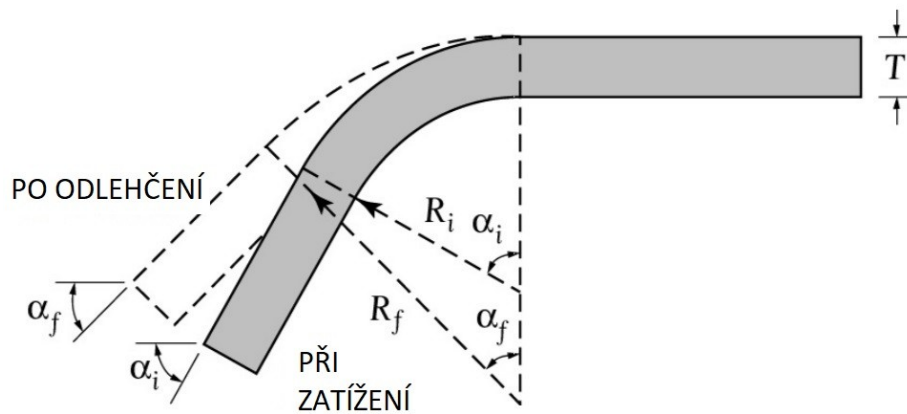
Obr. 6. Schéma výroby ohybu pomocí elastomeru (A – ohyb do V, B – vícenásobný ohyb) [12]

Pro všechny druhy ohýbání platí, že čím je menší poloměr zaoblení ohybníku, tím je menší potřebná hloubka vtisku a úhel odpružení [23]. Při ohýbání není ohybové napětí po průřezu materiálu konstantní, ale směrem od neutrální osy narůstá. Tudíž nedochází ve všech místech průřezu k překročení meze kluzu a tím k trvalé plastické deformaci. Vlákna materiálu blíže ke střednici jsou zatížena napětím nižším než na mez kluzu, zde je uložena energie, která po odlehčení silového působení způsobí elastickou deformaci ve formě odpružení. Míru odpružení jakožto změnu úhlu ohybu lze formulovat také jako změnu poloměru ohybu [6].

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \cdot \left( \frac{R_i \cdot \sigma_k}{E \cdot T} \right)^3 - 3 \cdot \left( \frac{R_i \cdot \sigma_k}{E \cdot T} \right) + 1 \quad (9)$$

kde:

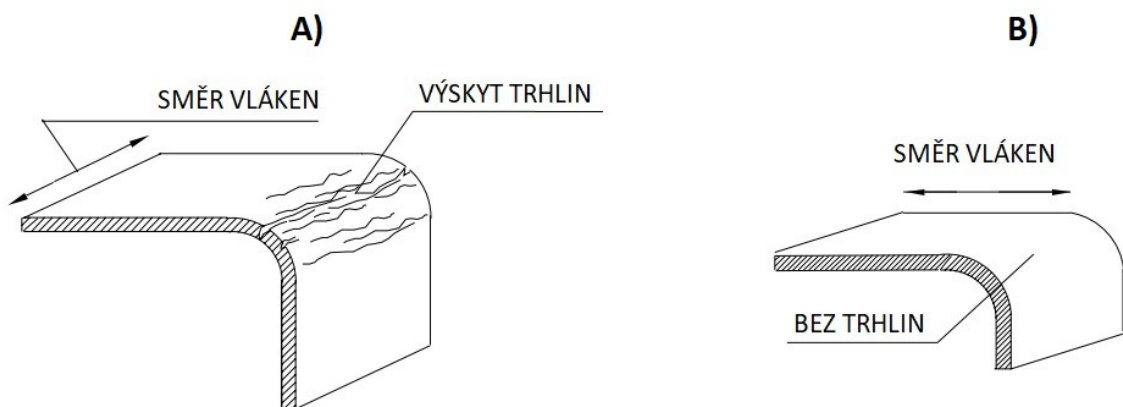
- $R_i$  – poloměr ohybu při zatížení [mm]
- $R_f$  – poloměr ohybu po odlehčení [mm]
- $\sigma_k$  – mez kluzu ohýbaného plechu [MPa]
- $E$  – Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]
- $T$  – tloušťka materiálu [mm]



Obr. 7. Schéma vzniku odpružení [6]

Aby byl dosažen kvalitní výlisek bez vad, je pro technologii ohýbání klíčový poloměr ohybu (viz kapitola 3.3 Zásady ohýbání plechů metodou Guerin).

Technologie ohýbání je závislá také na toku materiálu skrze předchozí zpracovatelské operace. Důvodem je anizotropie vlastností vzniklá předchozím tvářením např. válcováním. K takto válcovanému plechu je přiřazen nástřihový plán. Ten by se však neměl řídit pouze pravidlem o nejchopárnějším využití materiálu, ale i pravidlem, které respektuje následující technologii ohýbání (je-li zařazena). Důvodem je velké riziko vzniku trhlin na povrchu materiálu v případě, že je osa ohybu orientována shodným směrem jako směr vláken, viz Obr. 8 [6].

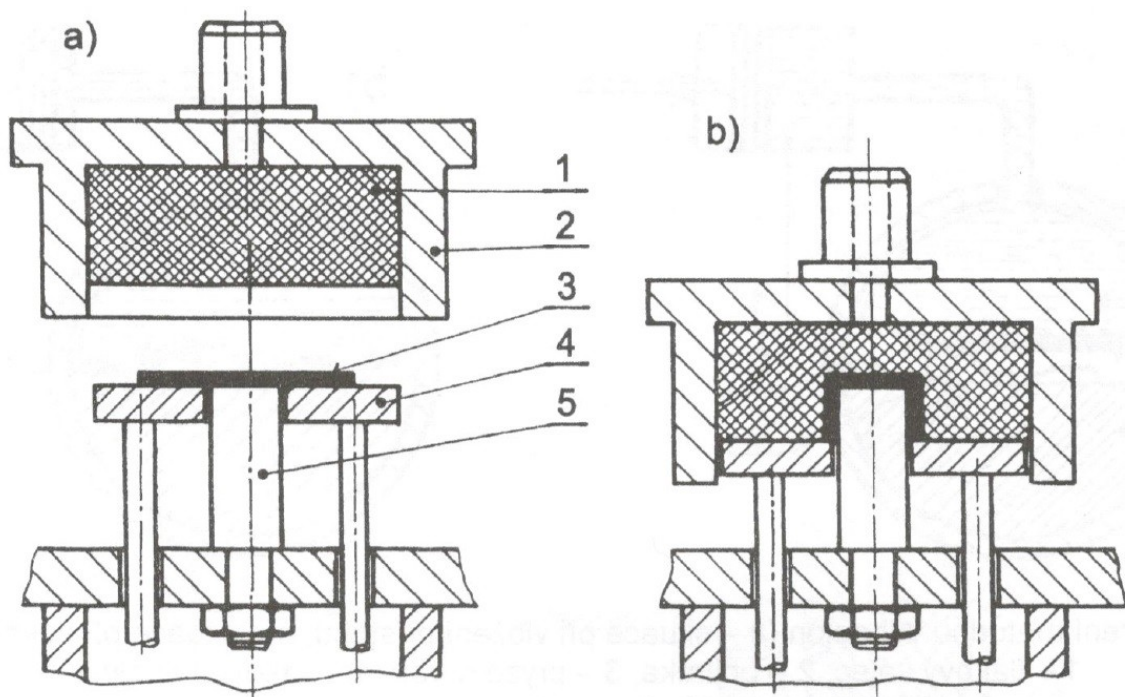


Obr. 8. Grafické znázornění ohýbání vzhledem ke směru vláken (A – špatně, B – správně) [6]

## 2.2 Tváření metodou Marform

Metoda Marform je nekonvenční způsob hlubokého tažení tenkých plechů. K deformacím polotovaru dochází prostřednictvím elastomerní výplně ve skříní tažnice, která se pohybuje směrem dolů k tažníku, na němž je uložen přístřih plechu. Plech je během tažení svírán z jedné strany elastomerem, z druhé pak přidržovačem. Zvlnění a povrchové kontrakce taženého dílce závisejí na udržení konstantního tlaku během tažení. Svěrnou sílu přidržovače je tak třeba kontrolovat manometrem. Prostor kolem přidržovače je nezbytné utěsnit, abychom předešli riziku, že elastomer bude téct ze skříně a nebude se tak efektivně podílet na vzniku potřebného tlaku pro tažení a kalibraci výrobku.

Nestlačitelnost elastomeru hraje v tomto procesu významnou roli v produkci tlaku na dílec a ten je snáze dokonale tvářen v zaoblených oblastech v porovnání s tažením konvenčním. Je možné vytvářet i nerotační výtažky např.: čtvercové, šestihranné a nesympetrické s různými reliéfy.



Obr. 9. Schéma tažení technologií Marform (a – situace při vložení přístřihu, b – situace na konci tažení, 1 – elastomerní polštář, 2 – objímka, 3 – přístřih plechu, 4 – přidržovač, 5 – tažník) [20]

Díky nízkým hodnotám napětí ve výtažcích během tváření je možné dosáhnout až 60 procentní redukce průměru z rondelu na kruhový výtažek, což je téměř dvojnásobná hodnota v porovnání s konvenčním tažením. Nízká napětí jsou také příčinou výskytu zpevnění až u výrazně hlubších tahů oproti konvenčnímu tažení. Vzhledem k lepšímu toku materiálu je možno tvářet i rozměrnější plechy.

Tažníky se vyrábějí ze slitin lehkých kovů a nepevná část nástroje by měla být 1,5 až 2 krát vyšší než celková hloubka výtažku. K předejití poškození elastomeru při hlubších tazích je vhodné, aby značně přesahoval styčnou plochou polotovaru.

Metoda Marform je časově náročnější technologie, kdy je rozsah uskutečněných operací od 60 do 240 za hodinu. Výhodou je však to, že poskytuje značně vyšší hloubky tahů a lepší kvalitu povrchu než metoda Guerin [9].

Tlak pro tažení plechu s přidržovačem za použití elastomeru se určí vztahem:

$$p = 3,2 \cdot \sigma_{pt} \cdot \frac{s_p}{h_{\min}} \quad (10)$$

kde:

- $p$  – potřebný tlak [MPa]
- $\sigma_{pt}$  – mez pevnosti v tahu materiálu [MPa]
- $s_p$  – tloušťka polotovaru [mm]
- $h_{\min}$  – nejmenší prolisovaná hloubka [mm]

Zásadní je otázka velikosti tlaku na přidržovači. Pokud bude velikost tlaku na přidržovači vysoká, dojde k utržení okraje výtažku. Bude-li malá, dojde ke zvlnění okrajů materiálu. Experimenty byly zjištěny hodnoty tlaku přidržovače  $p_H$  pro vybrané materiály (viz *Tab. 1*).

*Tab. 1. Hodnoty tlaku přidržovače  $p_H$  pro vybrané materiály [22]*

materiál	$p_H$ [MPa]	
	od	do
dural	35	40
hliník	30	35
ocel	60	65
nerez	70	90

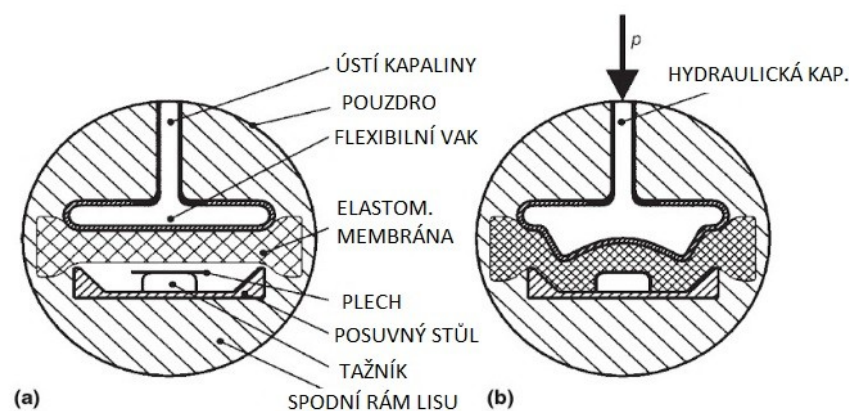


### 2.3 Tváření metodou Verson – Wheelon

Jedná se o metodu, která využívá tlak hydraulické kapaliny na elastomerní membránu (respektive vak) pro přetvoření přístřihu plechu. Plech je umístěn přes okraje pevného tažníku. Proces probíhá tak, že do tvarově přizpůsobivé tažnice pokryté a utěsněné elastomerem je přivedena hydraulická kapalina, jejíž silové působení nejdříve přetvaruje elastomer a ten následně táhne polotovar přes konturu tažníku [6].

Celý děj probíhá tak, že v prvním kroku sjede tažnice s hydraulickou komorou do nejnižší pozice, dále je do komory přivedena hydraulická kapalina. Expanze hydraulické komory zformuje elastomer a ten dále plech [15].

Jelikož je sílové působení kapalin snadné kontrolovat pomocí manometrů, je technologie všestranná, co se do tloušťky tvářených plechů týče. Tloušťka plechů se standardně pohybuje od 0,05 do 10 mm. Během procesu je dosaženo všestranně jednotné velikosti tlaku vyvozeného přes měkkí (30 až 40 tvrdosti ShA) pryžovou membránu. K předejití vzniku vad výlisků je klíčová právě jednotnost tlakového účinku na výrobek během procesu tváření, což tato metoda poskytuje ve značně vyšší míře v porovnání s metodami Guerin a Marform. Tato technologie je limitována hloubkou tahů obdobně jako metoda Guerin, ovšem je schopna poskytnout větší hodnoty tlaků, a to řádově od 40 do 70 MPa. Důsledkem je možnost tažení rozměrnějších, tvarově složitějších a přesnějších výtažků [9]. Při tažení slitin hořčíku je nezbytný ohřev. K tomu může být speciálně uzpůsobený posuvný stůl (viz Obr. 10.), do něhož mohou být zabudována topná tělesa. V takovém případě je nutností vzít v potaz teplotní použitelnost materiálu, ze kterého je membrána vyrobena [25].



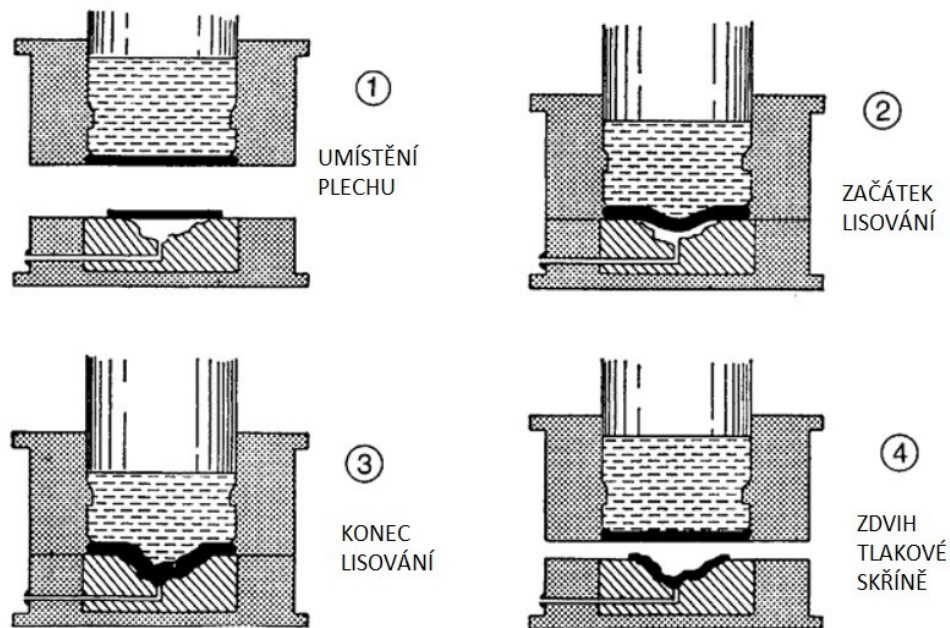
Obr. 10. Schéma tažení metodou Verson – Wheelon (a – situace při vložení přístřihu, b – situace na konci tažení) [15]

## 2.4 Tváření metodou SAAB

Tato technologie pochází ze Švédska, kde místní letecká společnost v období 50 let minulého století vytvořila metodu využívající několika nepevných látek: kapalnou emulzi, vzduch a elastomeru k tažení kovových plechů.

Průběh tažení je započatý pohybem válcové tyče, která z jedné strany uzavírá komoru s tlakovou kapalinou. Naproti tyči je na druhé straně komory elastomerní membrána, která plní nejen těsnící funkci, ale především poskytuje přenos tlakové energie kapaliny vyvolané tyčí na plech, čímž jej tváří [26]. Pod plechem je umístěna tažnice s řízeným odsáváním vzduchu [8]. Bez odsávání vzduchu by nedošlo k dokonalému vytvarování plechu podle geometrie tažnice a byly by zapříčiněny povrchové nerovnosti.

K tažení se používají vysoko-tonážní lisy (1000 až 30000 kN), jejichž volba závisí hlavně na rozměrech a vlastnostech plechu. Touto metodou může být důkladně snížen počet tvářecích operací kvůli téměř neomezené možnosti designu tažnice [9].



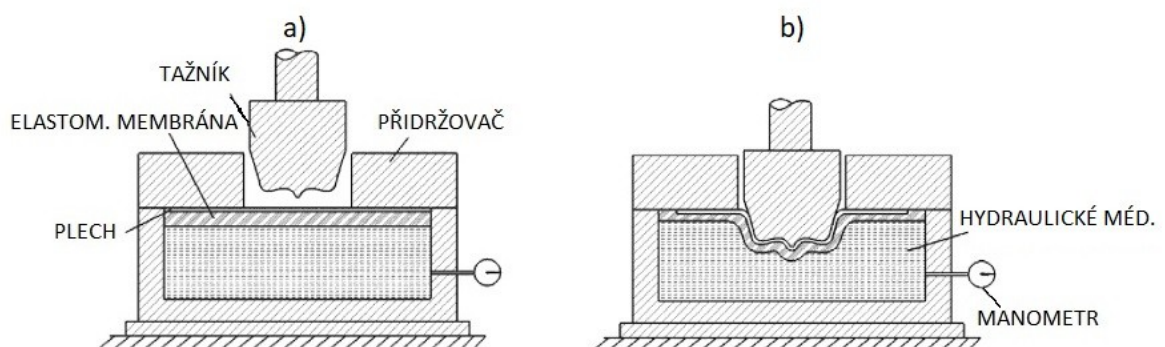
Obr. 11. Schéma tažení metodou SAAB [3]

## 2.5 Tváření metodou Verson – Hydroform

V technologii tváření Verson – Hydroform je hydraulický tlak kapaliny činitelem tvarování membrány z elastomeru, jež pokrývá přístřih plechu. Hlavní rozdíl mezi ostatními technologiemi využívajícími elastomerů je ten, že tažnice je částečně naplněna hydraulickou kapalinou [10].

Kapalina je uložena pod 60 až 70 mm silnou elastomerní membránou [8]. Velikost tlaku na tvarovaný plechový dílec je určena hloubkou tažení. Proces se uskutečňuje na hydraulicky poháněných lisech, kde v horní nestacionární části je umístěn tažník, pod ním ve spodní části pracovního prostoru je flexibilní tažnice. K správnému ustavení polohy polotovaru se využívá polohovatelné spodní i vrchní části nástroje. K upnutí materiálu slouží nejen přídržovače na straně tažníku, nýbrž také elastomerní membrána pod tlakem hydraulické kapaliny na straně tažnice.

Operace začne ustavením polohy přístřihu plechu, poté se přivede potřebný tlak hydraulického média do tažnice. Nyní je možné řídit posuv tažníku směrem do tažnice a sledováním hodnoty tlaku kapalného média táhnout plech do požadovaného tvaru. U tohoto procesu jsou dosahované hodnoty tlaků do 100 MPa a silně závisí na geometrii a materiálu výtazku. Tlaky pro tažení slitin hliníku se pohybují v rozmezí od 5 do 20 MPa, u ocelí ke tváření od 20 do 60 MPa a u nerezavějících ocelí jsou tyto hodnoty od 30 do 100 MPa [9].



Obr. 12. Schéma tažení metodou Verson – Hydroform (a – situace při vložení přístřihu, b – situace na konci tažení) [9]

Tření mezi nepevnou membránou a taženým plechem, jenž se tvaruje podle tažníku, je prevencí proti ztenčení plechu a celkově působí kladně na tok materiálu kolem geometrie tažníku. Obdobně jako u metody Marform je nepevné prostředí výhodné z hlediska variabilních rádiusů, které chrání výtazek během procesu tváření proti akumulaci vysokých lokálních napětí.

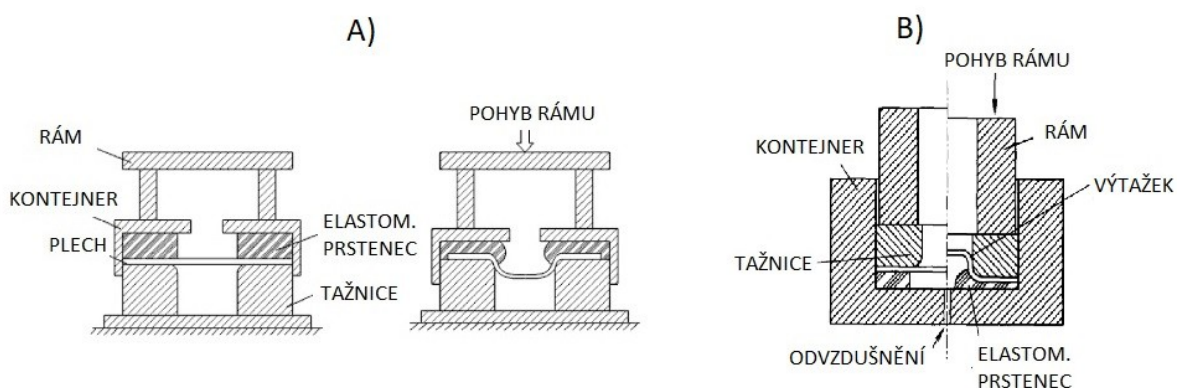
Na první tah je možná redukce průměru polotovaru až o 70 procent, v následujících tazích je možno dosáhnout až 40 procentního zmenšení průměru. Značná velikost styčné plochy během procesu a nízké tlaky působí kladně proti vzniku zpevnění. Ztenčení stěny je minimální, prakticky do 10 procent [9].

Technologie je vhodná pro hloubky výtažků od 125 do 300 mm. Efektivitu metody z hlediska ekonomiky je možné posoudit počtem vykonaných cyklů za hodinu, jejichž rozsah se pohybuje od 90 do 200. Časy se dají korigovat velikostí tlaku a rychlosti, které jsou si nepřímo úměrné.

## 2.6 Tváření metodou Maslennikov

V roce 1957 byla vytvořena metoda pro tváření rotačních výtažků. Její zvláštností je to, že tažník nepřichází do styku s plechem, nýbrž s anuloidem z elastomeru [11].

Proces tváření se uskutečňuje tak, že po vložení rondelu na pevnou stacionární tažnici s válcovou dutinou, se rovnoměrným přísuvem přiblíží tažník s elastomerním anuloidem. V první fázi dojde k zafixování polohy přístřihu plechu, v následující se uskuteční samotné tažení, kdy elastomerní prstenec svou tvarovou deformací přetváří plech radiálně do dutiny tažnice. Tento pohyb vyvine radiální třecí sílu mezi prstencem a polotovarem, která deformuje plech dle geometrie tažnice. Po ukončení tváření se pevný tažník odtáhne a anuloid je přiveden do původního tvaru [9].

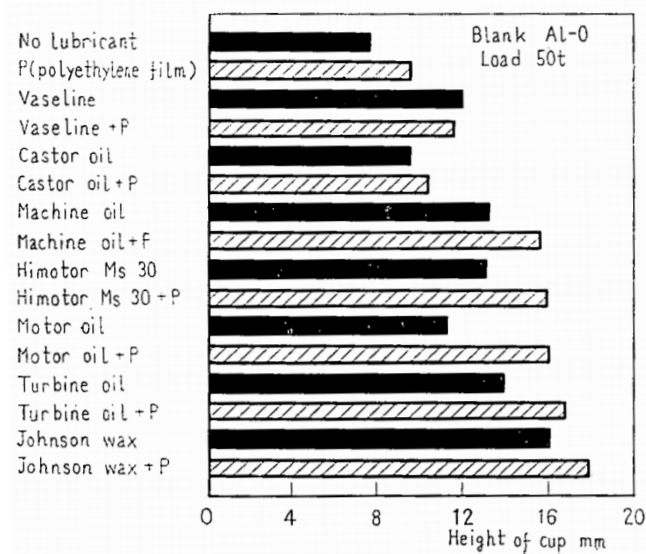


Obr. 13. Schéma tažení metodou Maslennikov (A – uspořádání nástroje s tažnicí pod elastomerním prstencem, B – uspořádání nástroje s tažnicí nad elastomerním prstencem) [12]

Opakovaným lisováním prstence byly vyrobeny velmi hluboké výtažky s koeficientem tažení velikosti 6. Nicméně takovéto změny průměru výtažku a tloušťky stěn vyžadují me-

zioperační rekrytalizační žíhání z důvodů vyčerpání tažnosti. Počet cyklů k obdržení mezioperačního koeficientu tažení závisí na řadě faktorů zahrnujících vlastnosti a rozměry elastomerního prstence i tvářeného plechu. Důležitým faktorem je také tření mezi prstencem a plechem, jež vychází ze silových stavů během operace. Velikost tření je možno korigovat mazáním a kvalitou povrchu všech stykových ploch.

Celý proces byl optimalizován přidáním dalšího tažníku, popřípadě tažnic. Tímto se dá dosáhnout nejen přesnějších rozměrů, ale taky např. vícero průměrů vnitřní dutiny [12]. Experimenty bylo zjištěno, že maximální hloubka tažení (do vzniku trhlin) je ovlivnitelná do značné míry mazáním viz *Obr. 14*. Dále bylo zjištěno, že zvlnění materiálu je nižší u elastomerních prstenců tloušťky nad 10 mm [14]. Pro co nejmenší zvlnění je dobré používat elastomerní prstencem se stejným vnitřním průměrem, jako dutina, do které je plech tažen. Pro metodu je vhodnější používat elastomer ve formě polyuretanu než v podobě pryže na bázi přírodního kaučuku [13].



*Obr. 14. Vliv mazání na maximální hloubku tažení [14]*

## 2.7 Tváření hydromechanické

Jedná se o proces, kdy tlak hydraulické kapaliny je v přímém kontaktu s přístřihem plechu a přetvaruje jej podle části formy, do které je tlačěn. Tento fakt utváří základní rozdělení tohoto výrobního procesu na metodu s pevným tažníkem a metodu s pevnou tažnicí [6].

V rámci úspěšné aplikace kterékoli z obou metod je nutné zvážit technologické podmínky, jmenovitě pak: vlastnosti a rozměry vstupujícího polotovaru, charakter styčných ploch plechu a tažníku / tažnice (tření, mazání), materiál pevné části nástroje a jeho geometrie, tlak vyvinutý hydraulickým médiem a tlak vyvinutý přidržovači, typ stroje (výkon, rychlosti pohybu rámu, zdvih, pracovní prostor atd.) a také rozměry a vlastnosti zhotovené součásti [16].



*Obr. 15. Hydromechanicky vyrobená část palivové nádrže automobilu [30]*

Tato technologie patří mezi nejprogresivnější v oblasti tváření plechů a trubek. Důvodů je celá řada. Např.: kratší výrobní časy (méně operací), absence pevného protikusku k tažníku nebo tažnici [6]. Nabízí také zásadní eliminaci vzniku vad výrobků, např. zvlnění, a to vlivem rovnoměrného tlaku kapaliny. Na straně kapaliny také nedochází k žádnému otisku nerovností. Tím je zajištěna lepší kvalita povrchu. Nespornou výhodou je udržení jednotné tloušťky materiálu, zpracovávají-li se technické dílce s proměnným průřezem. Naproti tomu je možné vyrábět i dílce s nestejnou tloušťkou materiálu [16]. Výrobky s malými vroubkami či dutinami je výhodné vyrábět právě pomocí této metody, neboť v těchto místech může dojít k výraznému zpevnění oproti konvenčnímu lisování [25].

Nevýhoda může být např.: delší výrobní časy (doba, po kterou se čerpá a vypouští médium), vysoká cena výrobního stroje.

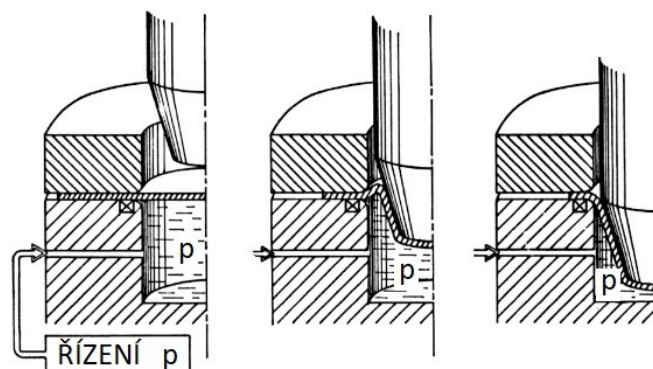
V současné době je předmětem zájmu dalšího vývoje této metody její kombinace s úpravou teplot tváření (ohřevem). Ohřevem nástroje nebo jeho části můžeme dosáhnout nejen snížení potřebných procesních tlaků, ale i omezení vzniku vad výlisků. Naproti tomu předehřevem materiálu je možné získat větší koeficient tažení, tedy větší redukci průměru na jednu operaci, což je výhodné zvláště u slitin, které mají za studena malou tažnost [16].

### 2.7.1 Tváření hydromechanické s pevným tažníkem

Plech je tažen přes povrch tažníku jeho pohybem normálově do nepevné tažnice, která poskytuje z opačné strany plechu potřebný protitlak akumulovaný hydraulickou kapalinou [15]. Médium v tažnici je tlakováno a kontrolováno buď aktivně tzn. zdrojem hydraulického tlaku (čerpadlem) nebo pasivně. Pasivní způsob využívá pojistného ventilu. Při pohybu tažníku směrem do tažnice je povolen únik kapaliny skrze tento pojistný ventil, na němž je možnost proces do určité míry regulovat [16].

Tlak média se při této metodě kladně odráží k udržení konstantní tloušťky plechu kolem tažníku, protože jeho působením vzniká mezi plechem a tažníkem značná třecí síla.

Metoda je energeticky náročnější oproti konvenčnímu tažení. Je vytvořen tlak kapaliny proti plechu a tažníku. Výrobní stroje pro metodu s pevným tažníkem jsou tak relativně dražší. Záleží ale taky na geometrii součásti, sériovosti a kolik druhů součástí na takovém stroji bude vyráběno [16].

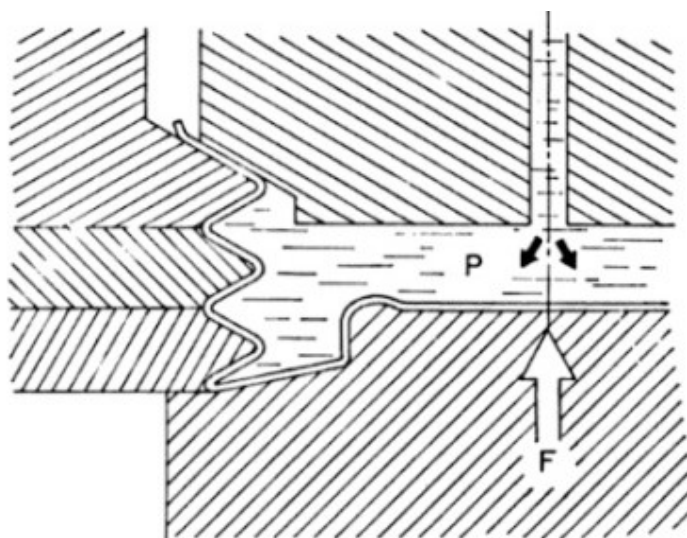


Obr. 16. Schéma výroby výlisku hydromechanickým tažením s pevným tažníkem [25]

### 2.7.2 Tváření hydromechanické s pevnou tažnicí

V tomto procesu je plech tvářen tlakem kapaliny proti tažnici, viz *Obr. 17*. Během procesu je tok materiálu z příruby do dutiny kontrolován přídržovači [16]. Ty také zajišťují utěsnění a izolování soustavy vůči úniku média [25].

Tvářecí operace může být rozdělena do dvou fází. V první dochází k volné deformaci plechu pouze hydraulickým tlakem a dosednutí plechu na povrch tažnice. Ve druhé fázi dochází k tvarování plechu dle kontury tažnice k požadovanému tvaru. Regulací tlaku přídržovačů a média je možné získat potřebné deformace plechu [6].



*Obr. 17. Schéma Hydromechanického tažení s pevnou tažnicí [25]*

Při uvážení možnosti tváření různých kovových slitin s odlišnými hodnotami tažnosti se metoda stává univerzální v oblasti malosériové produkce automobilních součástí, kde jsou ceny forem vysoké. Metodou je možno současně tvářet jeden nebo dva plechy. Rovnoměrné působení tlaku kapaliny dává jednotnou distribuci napětí a deformací, což v porovnání s konvenčním tažením je velkou výhodou. Při konvenčním tažení se kolem zaoblení tažníku nachází oblast kriticky náchylná ke vzniku vad. U této metody zmíněná oblast nevzniká. Metoda je náročná na vysoké tlaky u okrajů respektive hran a zaoblení součástí. Tlak média je závislý na materiálu a tloušťce plechu a nejmenším rádiusu v geometrii tažnice [16]. Dá se určit následujícím vztahem [22]:

$$p_{\text{kap.}} = \frac{2 \cdot s_p}{r_{\text{min1}}} \cdot \sigma_{\text{pt}} \quad (11)$$

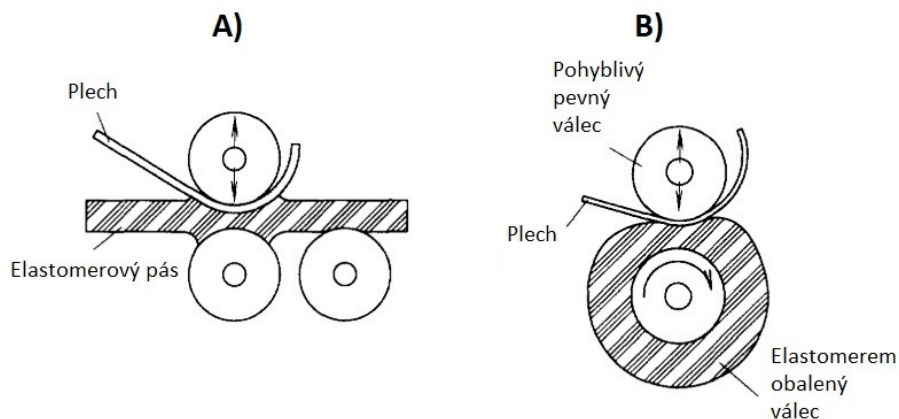


kde:

- $p_{\text{kap}}$  – tlak hydraulické kapaliny [MPa]
- $s_p$  – tloušťka plechu [mm]
- $r_{\text{min1}}$  – nejmenší zaoblení vyplněné plechem [mm]
- $\sigma_{\text{pt}}$  – pevnost v tahu materiálu [MPa]

## 2.8 Zakružování plechů elastomery

K přetvoření rovinného plechu do plochy s daným poloměrem křivosti je možno použít nepevného nástroje z elastomeru. Známý jsou dva způsoby, viz *Obr. 18*. První z nich využívá elastomeru v podobě desky nebo pásu na dvou či tříválcové stolici. Druhá metoda se provádí na dvouválcové stolici, kde je jeden z válců obalen vrstvou elastomeru [12].



*Obr. 18. Zakružování elastomery (A – zakružování pásem z elastomeru, B – zakružování válcem obaleného elastomerem) [12]*

Princip metod je stejný. Plech je vložen a následně vtažen mezi otáčející válce. Oba válce bývají z pevného materiálu s tím rozdílem, že kontaktní plocha válce uloženého dole bývá ve styku s elastomerem. Plech je deformován do požadované křivosti stlačováním elastomeru. Velikost křivosti se seřizuje hodnotou stlačení elastomeru pomocí oddalování a přiblížování os válců. Výhodou je, že ji lze měnit i v průběhu operace, tudíž je možno obdržet výlisek, který je po své délce rozlišně zaoblen [27]. Kladem nekonvenční metody je možnost zakroužení plechu na jedinou operaci [1].

Z důvodů delší výdrže a nižšího opotřebení se používají elastomery o větší tvrdosti cca od 80 ShA.

### 3 NÁSTROJ PRO TVÁŘENÍ PLECHŮ METODOU GUERIN

Předmět řešení konstrukce nástroje se odvíjí podle prováděné operace, geometrie a materiálu výrobku. Na základě konkrétního problému je možné sestavit dané řešení. Univerzálnost zařízení je dodržena, jestliže je využit společný základ dílů pro kteroukoli technologii (výrobek). Na tento základ je následně možno bez potíží a s jednoduchostí skládat již konkrétní komponenty pro určenou technologickou operaci.

#### 3.1 Stavba zařízení pro metodu Guerin

Jednotlivé operace tváření metodou Guerin, kladou jisté nároky na konstrukční prvky nástroje.

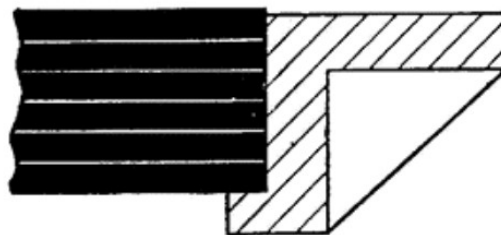
Co mají všechny prováděné technologie v rámci tohoto nástroje společné je nutnost fixace lisovnice, lisovníku k jednotlivým částem rámu lisu. Při odtahu lisovníku na beranu dochází k vratné deformaci elastomeru, současně je uvolňován lisovaný plech. Zde vzniká riziko krátkodobého uvíznutí plechu, který by mohl vybočit nepevnou lisovnici.

Přesnost lisování je podmíněna dostatečnou tuhostí a seřízením soustavy stroj, nástroj, výlisek. Nástroj je nutné správně zapolohovat vůči spodní desce rámu a beranu, aby osa pohybu stroje byla totožná s osou pohybu nástroje. V případě různoběžnosti os by mohlo dojít ke vzniku momentů a vybočení nástroje z pracovní polohy. Stejně pravidlo platí tedy i pro vzájemnou polohu lisovníku a lisovnice. K dodržení geometrické přesnosti výrobku se zajišťuje fixace materiálu k pevné části nástroje. S rostoucím stupněm přesnosti ve výrobě rostou časy a cena. Nejen proto je třeba najít snadno vyrobitelné, bezúdržbové prvky, kterými se výlisek spolehlivě zajistí. Použití normalizovaných součástí je v tomto ohledu klíčové.

Elastomer bývá uložen v kufříku neboli skříni či kontejneru. Tato část nástroje se, nehledě na druh operace, řídí několika zásadami. Musí být dostatečně dimenzována a musí zajistit vhodnou fixaci elastomeru v kufříku. V případech, kdy je elastomer do kufříku umísťován s přesahem, je vhodné zajistit odvod vzduchu z prostoru pod elastomerem. K odvodu tohoto vzduchu bývají ve dně kufříku zhotoveny otvory. Ty je vhodné vytvořit takové velikosti, aby se daly využít rovněž pro vyrážení či vyfukování elastomeru z kufříku ven (např. z důvodu výměny následkem opotřebení). Je však nutné pamatovat také na to, že by při tváření mohlo dojít k nežádoucímu vytlačování elastomeru těmito otvory. Proto je vhodné otvory zaslepit.

Z hlediska mechanického opotřebení elastomeru je také vhodné ostré hrany kufru dostatečně zaoblit. Pro deformovaný elastomer je totiž z hlediska jeho mechanického opotřebení výhodnější, když bude téci kolem zaoblených a delších hran mimo pevně vymezené úžiny [22].

Pokud je elastomer uložen v kufru volně, není výše zmíněných otvorů zapotřebí. Naproti tomu se elastomer musí v kufru zajistit proti vypadnutí jiným způsobem. Nejsnazší možností je vytvořit kufr takovým způsobem, aby byl elastomer ze spodu podepřen viz *Obr. 19* [3].



*Obr. 19. Způsob uchycení elastomeru v kufru tvarovým způsobem [3]*

Vzdálenost mezi nejbližšími hranami kufru a ponorné desky je odvozena podle velikosti pracovního tlaku. Pro tlak cca 20 MPa byla běžně používaná mezera 1 mm, s níž nebyl zaznamenán problém s tokem elastomeru do mezery [22].

Pro snadné, rychlé a spolehlivé zajištění plechového přístříhu se používají fixační kolíky. Po nasazení přístříhu na kolíky je mu zamezen pohyb v žádaných směrech. Nevýhodou je složitější příprava polotovaru s ohledem na nutnost zhotovení průchozích děr. V případech, kdy při postupném deformování elastomeru hrozí posunutí plechového polotovaru a vznik netolerované nepřesnosti, je použití fixačních kolíků nevyhnutelné. K předejití poškození elastomeru při jeho stlačování by měla být výška kolíku držena na minimu [3].

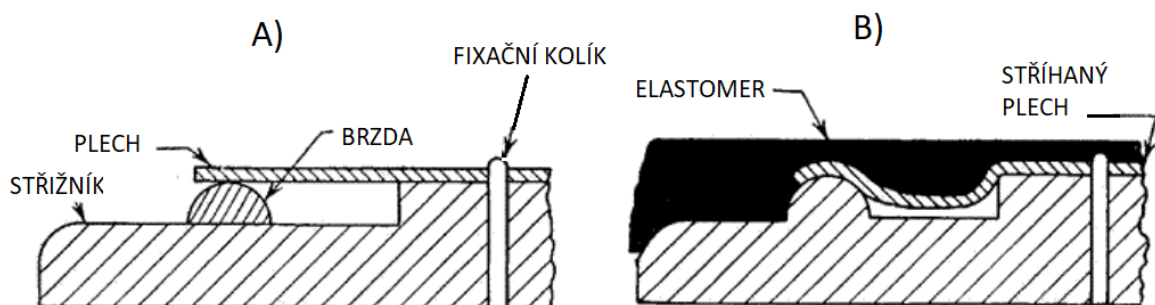
Elastomery mají vysoký koeficient tření. Proto je potřebné všechny styčné plochy mazat, aby během výroby nedocházelo ke komplikacím souvisejícím s deformováním elastomeru a plechu.

### 3.2 Zásady stříhání plechů metodou Guerin

Střížník musí být opatřen co nejostřejší dělicí hranou, je-li zaoblená, dochází k oddělení materiálu v jiném místě než na střížné hraně. Důležité je zkosení střížné hrany o 2 až 4° [22]. S větším úhlem hřbetu roste nebezpečí poškození elastomeru, s menším úhlem by mohlo dojít k odstřížení plechu v jiném místě než na střížné hraně.

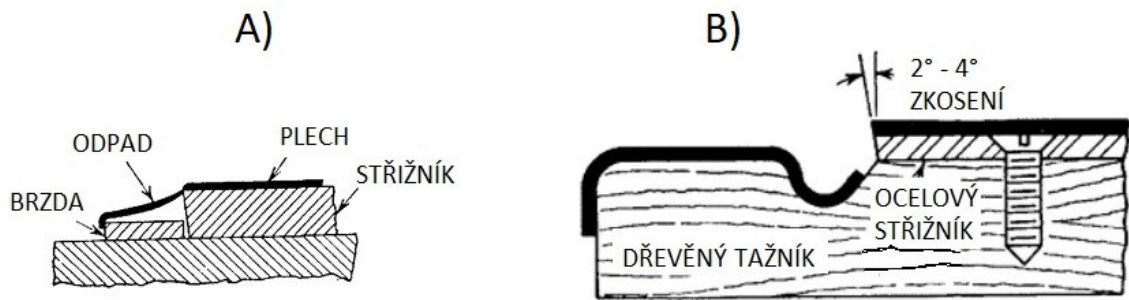
K určení výšky střížníku, respektive velikosti přečnívajícího okraje plechu dané tloušťky, byl uveden vztah v předchozí kapitole (2.1 – rovnice č. 6). Nesmí být opomenuto značné namáhání kufru, ve kterém je uložen elastomer.

Posuzujícím faktorem pro výběr elastomeru je tvrdost. Pro deskovou i blokovou výplň kufru platí, že tvrdost elastomeru v kontaktní ploše je použitelná v rozsahu od 70 do 90 ShA s hodnotou maximálního poměrného prodloužení od 300 %. Elastomery s nižší tvrdostí by byly náchylnější ke vzniku trhlin v kontaktních místech, zatímco na tvrdší elastomery (jejich deformaci) bychom museli použít výkonnějších strojů [3]. Při stavbě zařízení je možno použít prvků na zefektivnění technologie.



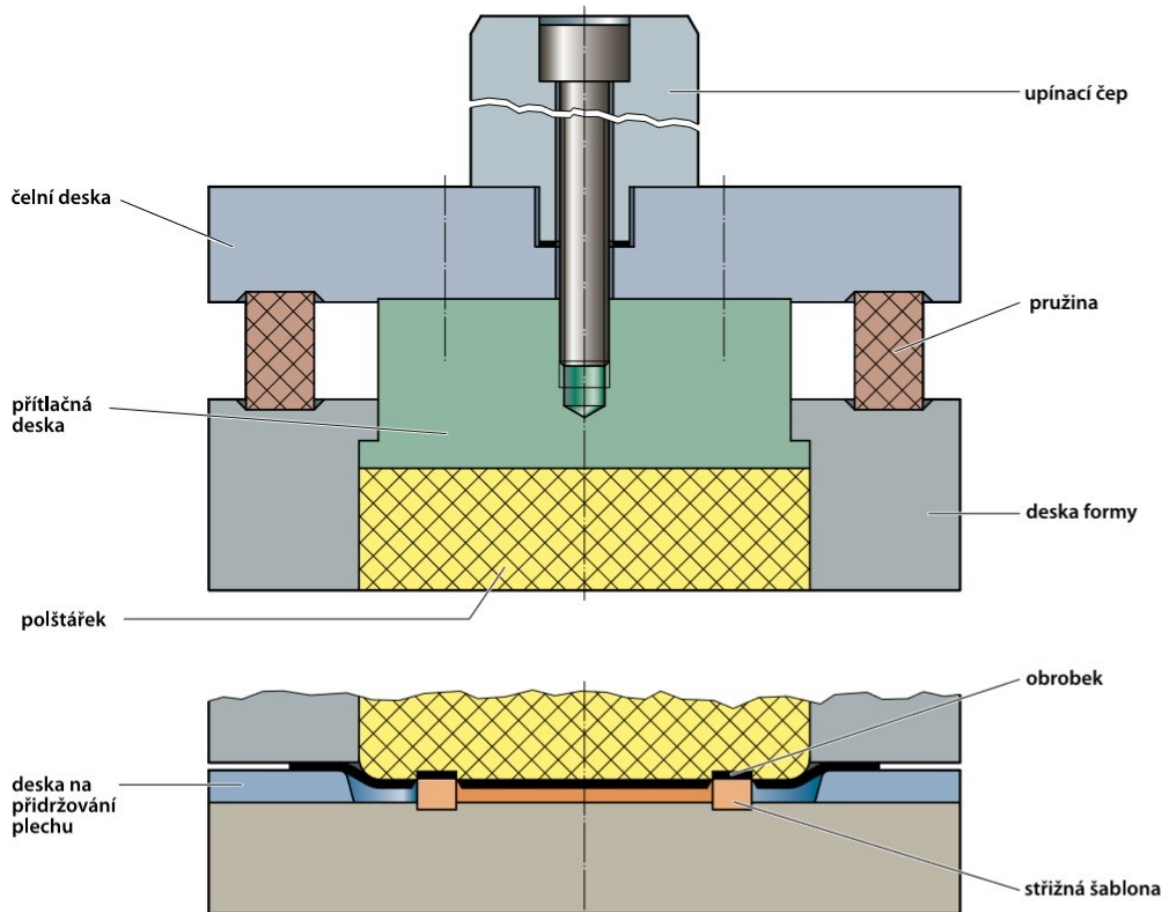
Obr. 20. Schéma použití brzdy a fixačních kolíků pro operaci stříhání elastomerem (A – situace před stříháním, B – situace během stříhání) [3]

Další součástí možné výbavy střížného nástroje bývá brzda. Ta slouží k opoře plechu a usměrnění působení tlaku na stříhaný plech. Dojde tak ke zkvalitnění střížné plochy na výstřižku. Brzda je důležitá při stříhání silnějších plechů nebo plechů z takových materiálů, na které je potřebné vynaložit větší práci. U těchto plechů dochází k mírnému zaoblení hrany podél ustřížené roviny. Brzda toto zaoblení zmírňuje [12].



Obr. 21. A - Použití odlišné geometrie brzdy pro stříhání než v obr. 20, B – kombinace stříhání a tažení [3]

V případě kombinovaného nástroje stříh a ohyb je možno v rámci úspory financí pracovat s odlišnými materiály na konkrétní části nástroje viz Obr. 21 - B.



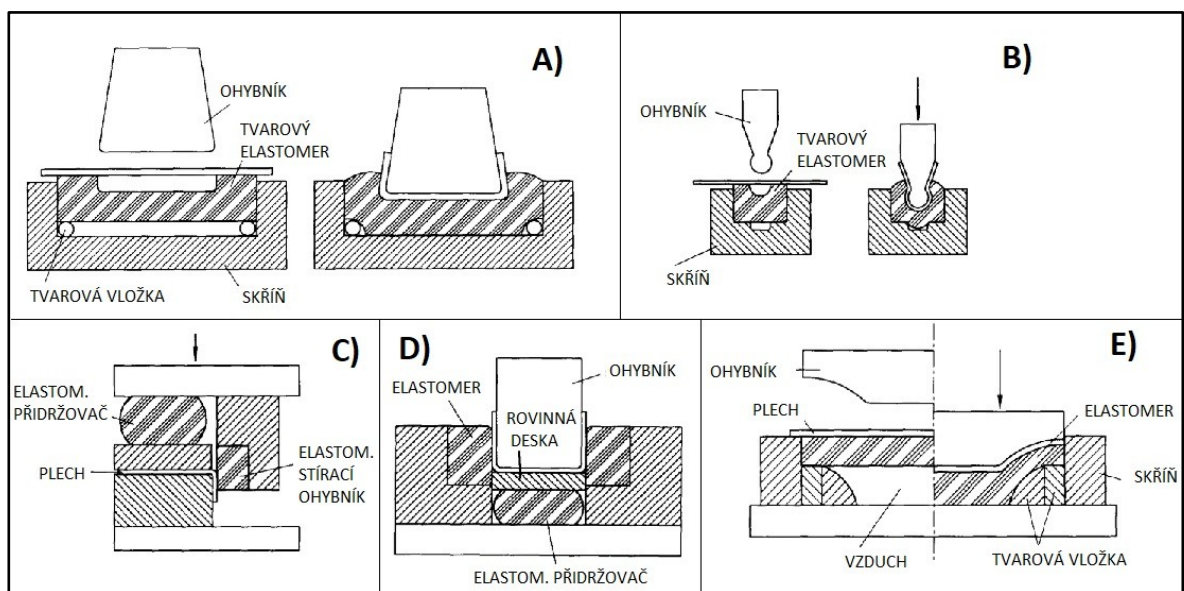
Obr. 22. Možné provedení střížného nástroje [23]

### 3.3 Zásady ohýbání plechů metodou Guerin

Charakteristickým rysem ohýbání pomocí elastomeru je právě tvar elastomerové vložky dle typu ohybu. Z důvodů rovnoměrného působení tlaku na plech je vhodné zajistit jistou

podobnost mezi prováděným ohybem a touto výplní. Toto uzpůsobení tvaru elastomeru přispívá k jeho delší životnosti, protože nedochází k tak výrazným deformacím, jako s elastomerem v tvarově neuzpůsobené podobě [12]. Pro ohýbání se volí tvrdost elastomeru od 50 do 80 ShA s tažností od 300 do 500 % [22].

Pro usměrnění tlaku na výlisek lze využít různých pevných vložek, klínů a podpěr, které se vkládají pod elastomer [23]. Díky elastickým vlastnostem elastomeru můžeme dostat ohyby o velikosti až 90°. Je k tomu ovšem nutné použít ohybník s úkosy. Geometrickou přesnost, např. rovinnost dna, lze zvýšit tak, že ohýbaný plech nebude v přímém kontaktu se snadno tvarovatelným elastomerem, nýbrž s ocelovou deskou viz *Obr. 23 - D*.



*Obr. 23. Příklady prováděných ohýbacích operací za použití elastomerových těles a jiných speciálních prvků [12]*

Při návrhu ohybníku, resp. ohybnice, musí být brán v úvahu fakt, že s klesajícím poloměrem ohybu se na tahem zatížené straně plechu zvyšuje riziko praskání materiálu. Nejmenší přípustný poloměr ohybu lze určit následujícím výpočtem [22].:

$$r_{\min} = k \cdot T \quad (12)$$

kde:

- $r_{\min}$  – nejmenší poloměr ohybu [mm]
- $k$  – materiálová konstanta (viz *Tab. 2*) [-]
- $T$  – tloušťka materiálu [mm]

Tab. 2. Hodnoty konstant  $k$ : vybrané materiály [22]

ohýbaný materiál	$k$ [-]
měď	0,25
měkká ocel	0,50
žíhaný dural	1,30
měkká mosaz	0,30
tvrdá mosaz	0,40
středně tvrdá ocel	0,55
kalený dural	2,50

Na druhé straně může vzniknout opačné riziko v případě velkého poloměru ohybu, při němž nenastane plastická deformace. Pro maximální přípustný poloměr ohybu platí následující vztah [6].:

$$r_{\max} = \frac{T \cdot E}{2 \cdot R_e} \quad (13)$$

kde:

- $r_{\max}$  – největší poloměr ohybu [mm]
- $E$  – Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]
- $T$  – tloušťka materiálu [mm]
- $R_e$  – mez kluzu ohýbaného materiálu [MPa]

Pro ideální poloměr ohybu neutrální osy (plochy s jedním nenulovým poloměrem křivosti) tedy platí následující nerovnice [6].:

$$r_{\min} \leq r \leq r_{\max} \quad (14)$$

kde:

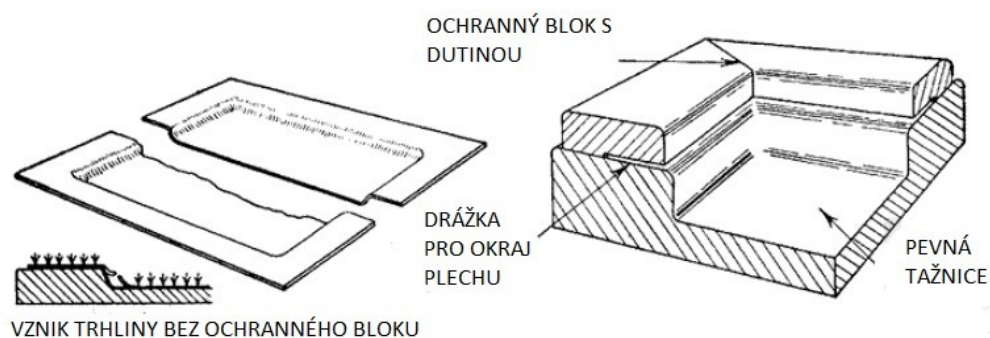
- $r_{\min}$  – nejmenší poloměr ohybu [mm]
- $r_{\max}$  – největší poloměr ohybu [mm]
- $r$  – skutečný poloměr ohybu [mm]

Na základě výše zmíněných vztahů je možné navrhnout geometrii ohybníku či ohybnice.

### 3.4 Zásady tažení plechů metodou Guerin

Metoda Guerin, jež neužívá přidržovačů, je vhodná pro tvorbu mělkých výtažků. K prevenci zvlnění vytvořených přírub musí být polotovar důkladně upevněn proti posunu stejně jako u konvenčního tažení. Zde je možno použít fixační kolíky viz kap.: (3.1). Části plechu, ve kterých dochází k přetváření, mohou být ošetřeny mazáním ke snížení tření a docílení tak rovnoměrnějšího tlakového působení na výtažek. Nástroj musí být vytvořen tak, aby nebyl otevřený jako například u ohýbání, a to kvůli nutnosti použití vyššího tlaku oproti ohýbání. Dojde-li k uzavření nástroje, tlak prudce vzroste, jelikož je elastomer ve své podstatě nestlačitelný. Nesmí být opomenuta rovněž maximální tvarová deformace elastomeru v tlaku, jejíž maximální hodnota je obvykle kolem 20 % [23]. Pro technologii tažení je vhodná tvrdost elastomeru od 60 do 80 ShA a tažnost od 300 do 500 %.

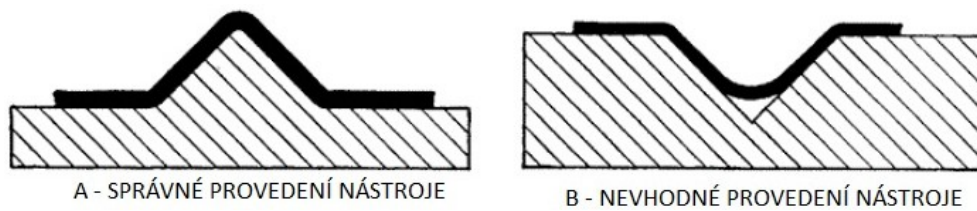
Problém v podobě vzniku trhlin na plechu se může objevit v případě, že do dutiny, kam je tažen, teče méně materiálu, než je nezbytné minimum. To je způsobeno tím, že stlačovaný elastomer vyvine příliš mnoho energie na okraje přístřihu a neumožní jim vtažení do dutiny. V takovém případě je možné nástroj upravit tak, aby okraj plechu byl překryt pevným ochranným blokem. Blok musí obsahovat dutinu, která pojme tloušťku plechu s vůlí. Tím pádem elastomer vyvine tlak na blok a následně na část plechu, jenž nyní může volně téct do dutiny formy [3].



Obr. 24. Koncept ochranného bloku [3]

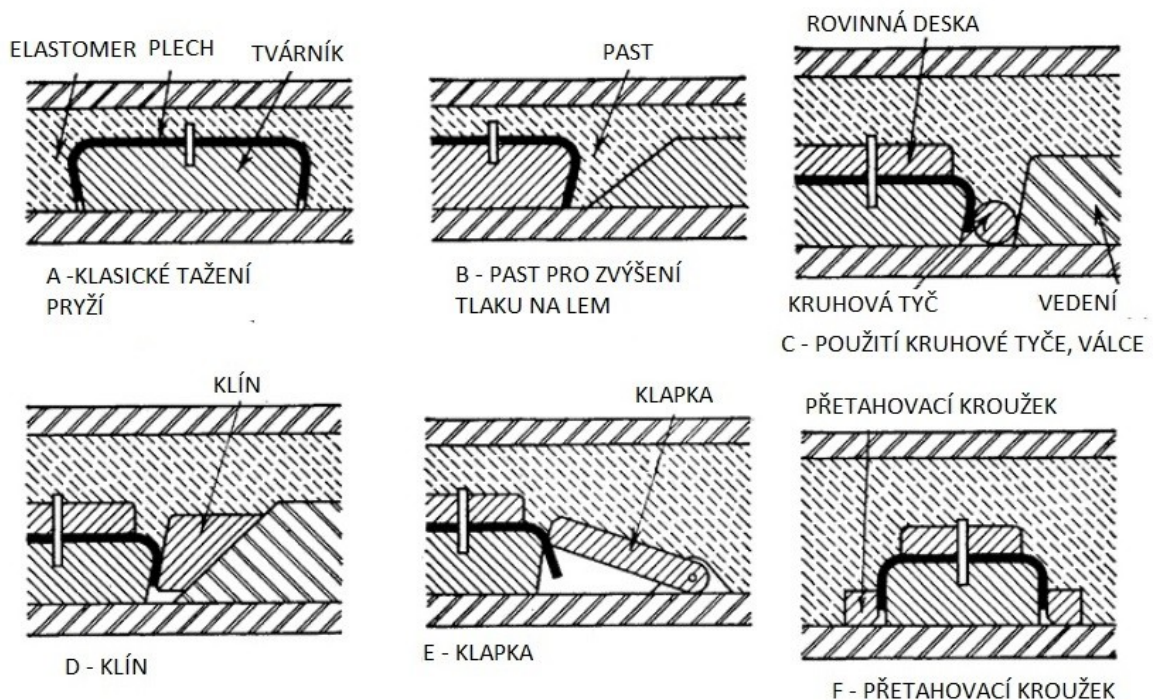
Obecně je důležité neopomenout skutečnost, že tváření plechů pomocí elastomeru je snazší za použití pevných lisovníků než pevných lisovnic. Jedná se ale pouze o to, že v prvním styčném bodě elastomeru a plechu začne docházet k akumulaci tlakové energie a jakýkoliv nižší bod na geometrii nástroje má nižší potenciál být tvářen, jelikož klesá tažnost elastomeru i plechu. Navíc je nejvyšší bod geometrie pevně držen již nashromážděnou tlakovou energií a není mu umožněno se posouvat.





Obr. 25. Schéma zobrazení tváření konkrétního plechu (A – přes tvárník: vhodné řešení, B – do tvárnice: nevhodné řešení) [3]

Je vhodné upřednostňovat nástroj v sestavě s pevným lisovníkem, resp. tažníkem, ale v praxi se objevují případy (viz použití ochranného bloku), kdy je třeba tvářet do dutiny. Ochranný blok pro pevný tažník je možné vyrobit, ale pro jeho funkčnost je kritická stabilita. Dutina v bloku totiž musí pojmout plech s vůlí, zatímco blok samotný musí pevně stát kolem dvou protilehlých stran plechu. Jedná se tak spíše o tvorbu plechů s lemy než výtažků.



Obr. 26. Pomocné konstrukční prvky nástroje k zdokonalení lisování [3]

Pro navýšení tlaku na dílec a jeho následné přesnější přetvoření je možné použít různých konstrukčních prvků. V Obr. 26 – je znázorněno podkosení tvárníku k tvorbě ohybu zmenšeného o úhel odpružení na velikost  $90^\circ$ , B – ukazuje tvarovou vložku, jež usměrní tok elastomeru směrem k lemu, C,D,E,F – znázorňují pevné prvky, které navýší tlak na lem nebo tažený okraj a tím zajistí jeho přesnější tvarování a omezí riziko tvorby zvlnění [3].

## 4 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI PRÁCE

V první části textu práce pojednává o základech tváření. Ty ukazují základní pohled na to, co se s materiálem při tváření děje a jak je možné jej měnit ve prospěch zpracovatelnosti nebo výsledných vlastností výrobku. Následně práce navazuje tématem věnujícím se nepevným nástrojům (elastomerům a kapalinám), a to především z pohledu jejich vlastností, které jim umožňují aplikaci v tvářecích procesech. V další části textu jsou popsány vybrané nekonvenční metody plošného tváření plechů za použití nepevného nástroje. V pořadí od snazších ke komplexnějším a problematičtějším metodám. Byl kladen důraz na co nejkonkrétnější popis průběhu technologií, jejich nedostatky, přednosti a možné aplikace. Poslední téma tvoří přechod do praktické části práce, protože pojednává o konstrukci nástroje pro Guerinovu metodu tváření plechů. Představuje, co jednotlivé základní operace (stříhání, ohýbání a tažení) vyžadují, aby proces probíhal bez problémů.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE

Praktická část práce se věnuje konstrukčnímu návrhu nástroje pro Guerinovu metodu tváření plechů. Je kladen důraz na to, aby byl nástroj univerzální pro co nejširší rozsah tvářecích operací v návaznosti na jeho vlastní cenu. Zásadní je použitelnost na níže popsaném hydraulickém lisu ÚVI. Výroba nástroje musí být opřena o výrobní dokumentaci, jež bude vytvořena dle 3D CAD modelů. Pevný lisovník bude vyroben na frézce za pomoci vytvořeného programu v CAM softwaru. V neposlední řadě bude nutné kritické prvky nástroje zkontrolovat z hlediska mechanického namáhání. Po vyrobení a sestavení nástroje se přejde k experimentu cílenému na problematiku úhlu odpružení plechů.

## 6 SPECIFIKACE POUŽITÉHO HYDRAULICKÉHO LISU

Níže popsaný nástroj bude odzkoušen a používán na hydraulickém lisu CDC 2 – 7 od firmy Sklostroj Turnov.

Lis je vhodný pro nejrůznější drobné výrobní a montážní práce. Je uzpůsobený pro výrobu menších a středních dílců v sériové produkci. Lze na něm lisovat, rovnat, ohýbat, stříhat, táhnout, protahovat, nýtovat, razit atp. [30]

Stroj se skládá z rámu, jenž je třmenové, skříňové konstrukce a spolu s nádrží pracovního oleje, s válcem lisovacího pístu a pracovním stolem tvoří jednotlivý celek. V rámu se nachází vestavěné čerpadlo, k němuž je přišroubován přírubový elektromotor a skříňka s elektroinstalací. Pracovní stůl je přístupný ze tří stran, je v něm upínací drážka a vprostřed je propadový otvor umožňující vkládání dlouhých dílců [30].

*Tab. 3. Vybrané technické údaje hydraulického lisu CDC 2 - 7*

Veličina	množství	jednotka
Příkon	1,5	kW
Maximální lisovací síla	20	kN
Maximální odtahová síla	7,5	kN
Zdvih lisovacího pístu	160	mm
Otevření lisu	205	mm
Rychlost pístu při maximální síle	70	mm/s
Rychlost pístu při poloviční síle	110	mm/s
Rychlost pístu při odtahu	180	mm/s
Rozměry pracovního stolu	200 x 205	mm
Maximální pracovní tlak čerpadla	4,9	MPa
Hmotnost	150	kg



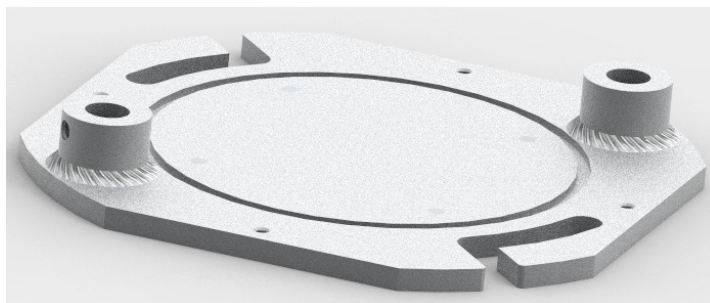
*Obr. 27. Hydraulický lis CDC 2 - 7*

## 7 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ UNIVERZÁLNÍHO TVÁŘECÍHO ZAŘÍZENÍ PRO METODU GUERIN

V nadcházejících kapitolách je rozebrána stavba navrženého nástroje. Finální verzi nástroje předcházely varianty, které obsahovaly výraznější nedostatky, jež bylo potřeba odstranit. A proto je zařazena i kapitola, která popisuje vývoj konstrukce nástroje od počátečního do konečného, realizovaného stavu. Ve fázi výroby a zkoušení nástroje se objevily prvky, které bylo nutné mírně upravit.

### 7.1 Návrh nepohyblivé základové desky

K této desce se upíná buď lisovník nebo lisovnice, je k tomu tvarově a funkčně uzpůsobena (ustavení polohy a upnutí). Tato nepohyblivá deska musí společně s pohyblivou deskou lícovat k zajištění správné funkčnosti. K tomu slouží lineární vedení, jehož vodící trny jsou umístěny do nábojů s otvory. Deska má na svém obvodu ve dvou protilehlých místech drážky pro upnutí k pracovnímu stolu lisu. Tyto drážky jsou inspirovány bajonetovým systémem uzavírání pro rychlé upínání. Celý tvar byl navržen tak, aby byl co nejsnáze vyrobitelný.

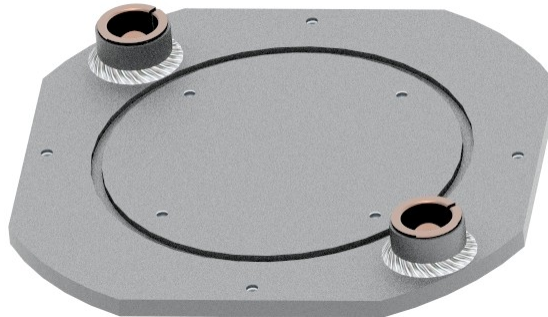


Obr. 28. 3D model nepohyblivé základové desky

### 7.2 Návrh pohyblivé základové desky

Pohyblivá základová deska slouží k upnutí lisovníku nebo lisovnice, stejně jako nepohyblivá základová deska. Tato deska je opatřena náboji s dutinou pro kluzná ložiska, která jsou součástí lineárního vedení. V ložiskách se deska posouvá po vodících trnech, které zajišťují vedení nástroje. Náboje musely být navrženy takových rozměrů, aby na jejich čelech

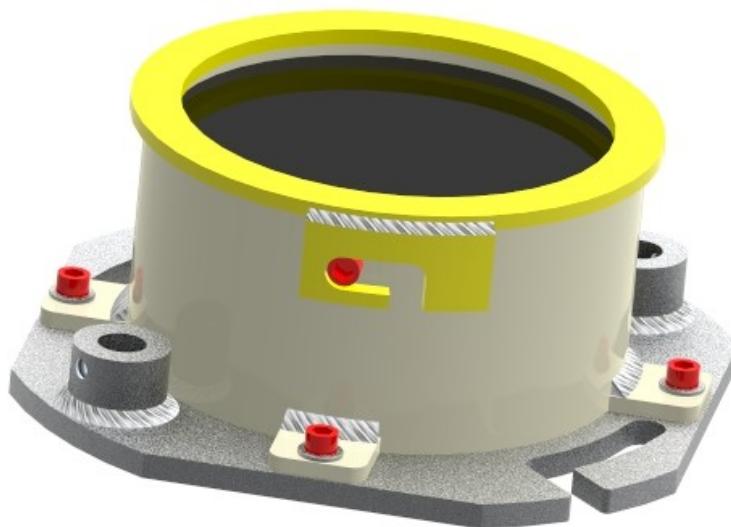
byla dostatečná plocha pro dosednutí pružin, ale současně aby nezasahovala do pracovního prostoru nástroje.



*Obr. 29. 3D model pohyblivé základové desky*

### 7.3 Návrh lisovnice

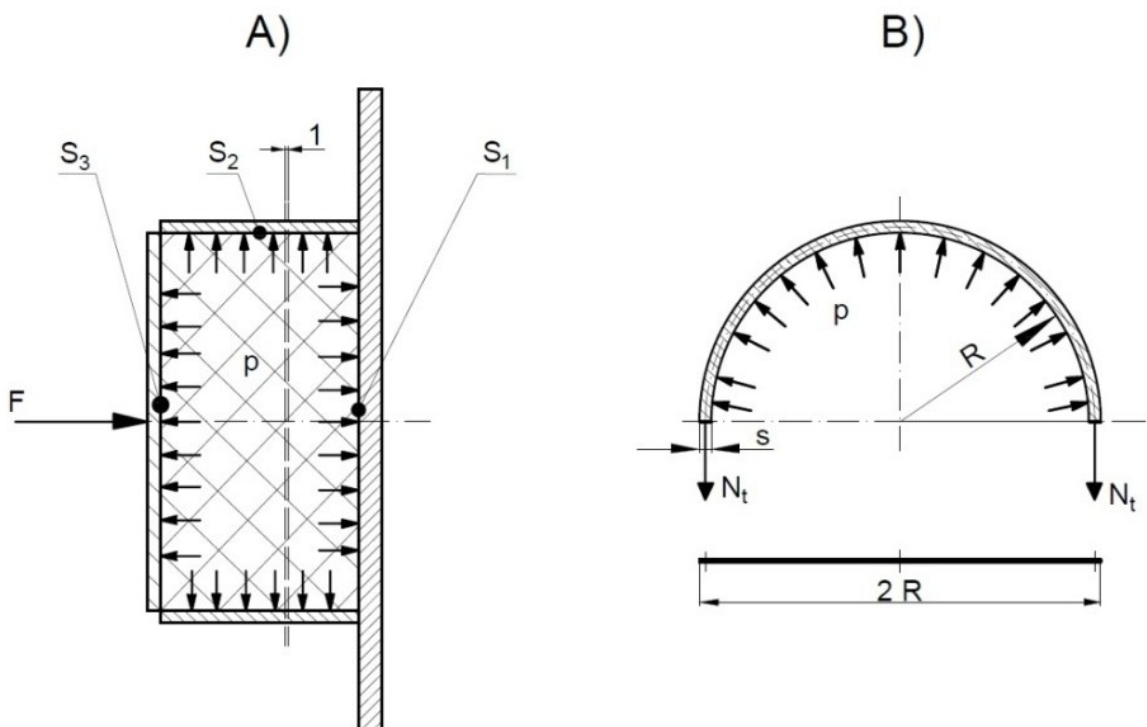
Lisovnice slouží k uložení pryže, za pomoci které probíhají operace tváření. V té je pryž ve formě desek. Lisovnice může být uložena stacionárně na ponorné desce pracovního stolu, nebo pohyblivě na beranu lisu. Což je dáno druhem tvářecí operace. Je-li uložena vzhůru dnem, je třeba pryž zajistit proti vypadnutí. K tomu v této konkrétní situaci slouží víko, jež je z výpalku plechu, na který jsou po obvodu proti sobě přivařeny dvě výseče trubky s drážkami tvarem inspirovaným bajonetovým uzavíráním. Sama lisovnice je v podstatě část trubky, na níž jsou ve spodní části přivařeny patky k jejímu upnutí k základové desce.



*Obr. 30. 3D model lisovnice upnuté k nepohyblivé základové desce*

Na lisovnici je během tváření vyvíjen tlak skrze vnikání lisovníku do prostoru pryží vyplněné skříně. Kritický stav nastane, jakmile začne docházet ke kompresi nestlačitelné pryže. V tu chvíli na všechny stěny lisovnice působí rovnovážný hydrostatický tlak, viz Obr. 31. Ve válcové části skříně s průřezem mezikruží se objeví tečné napětí, jež je uvažováno ve všech místech po obvodu stejné. Na toto napětí musí být skříň nadimenzována.

### 7.3.1 Výpočet velikosti tlaku a kontrola tloušťky stěny skříně



Obr. 31. Výpočtové schéma zatížení lisovnice (A – náhled na situaci v celém objemu dutiny lisovnice, B – pohled)

$$p_L = \int_{(S)} F \cdot \frac{1}{dS} = \frac{F}{\sum S} = \frac{F}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{20000}{65814,8} = 0,304 \text{ MPa} \quad (15)$$

$$2 \cdot N_t = p_L \cdot 2 \cdot R \quad (16)$$

$$N_t = p_L \cdot R = 0,304 \cdot 71,5 = 21,736 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$\sigma_t = \frac{N_t}{s} = \frac{21,736}{4,5} = 4,830 \text{ MPa} \quad (17)$$



kde:

- $p_L$  – tlak v lisovnici [MPa]
- $F$  – lisovací síla [N]
- $S_1, S_2, S_3$  – plochy lisovnice [ $\text{mm}^2$ ]
- $N_t$  – normálová síla v obvodu lisovnice [ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ ]
- $R$  – poloměr lisovnice [mm]
- $s$  – tloušťka stěny lisovnice [mm]
- $\sigma_t$  – tečné napětí ve stěně lisovnice [MPa]

Dle vztahu (15) bude na stěny skříně působit tlak o velikosti 0,304 MPa, přičemž tečné napětí v těchto stěnách bude dle vztahu (17) 4,830 MPa. Jelikož skříň bude vyrobena z oceli dle ČSN 11 375 (1.0038) o tloušťce 4,5 mm, jež má mez pevnosti v tahu 370 MPa, mez kluzu v tahu 222 MPa a mez kluzu ve smyku 133 MPa, je hodnota napětí ve stěnách skříně přípustná.

### 7.3.2 Výroba pryže pro výplň lisovnice

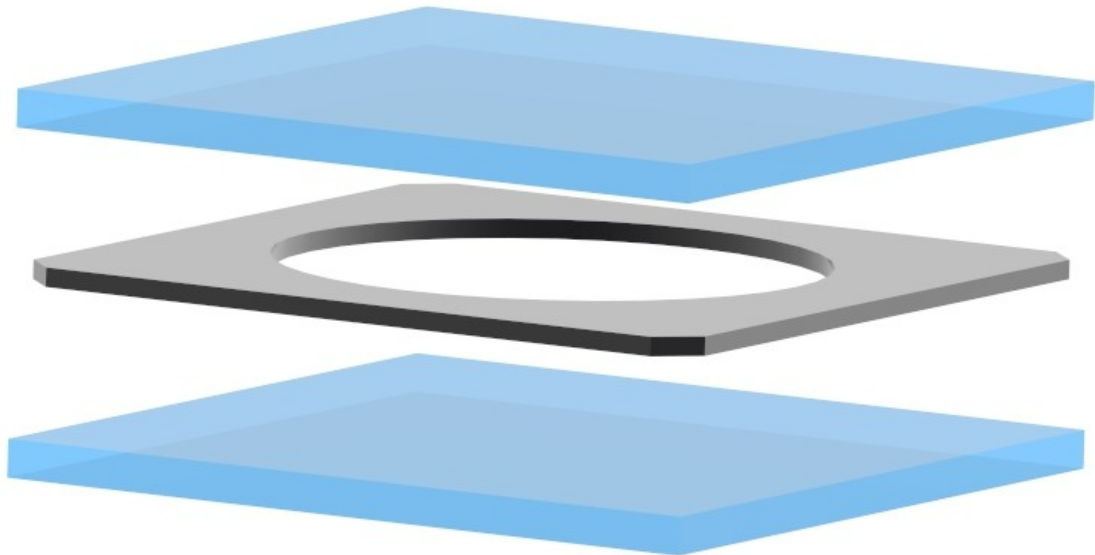
Pryž je použita jako nepevné tvářecí médium a musí mít požadované vlastnosti v závislosti na použité technologii. Ohled je brán především na tvrdost pryže, která se uvádí v jednotkách Shoreho stupnice a na tažnost uváděnou v procentech. Ostatní vlastnosti pryží nejsou pro tvářecí aplikace příliš směrodatné.

Tab. 4. Požadované vlastnosti v závislosti na typu technologie [3], [22]

Technologie	Tvrdost [ShA]	Tažnost [ % ]
Stříhání	70 ÷ 90	> 300
Ohýbání	50 ÷ 80	300 ÷ 500
Tažení	60 ÷ 80	300 ÷ 500

Při tváření mohou nastat problémy skrze vysoký součinitel tření, který pryže mají. Ten je potřeba snížit. Vhodným způsobem je např.: zaprášení jednotlivých vrstev pryžových desek minerálním práškem. Ten může být např. z klouzku, mastku nebo grafitu. Oleje jsou méně vhodné, protože nevytvoří potřebnou filmovou vrstvu, znečišťují více pracoviště a výrobky.

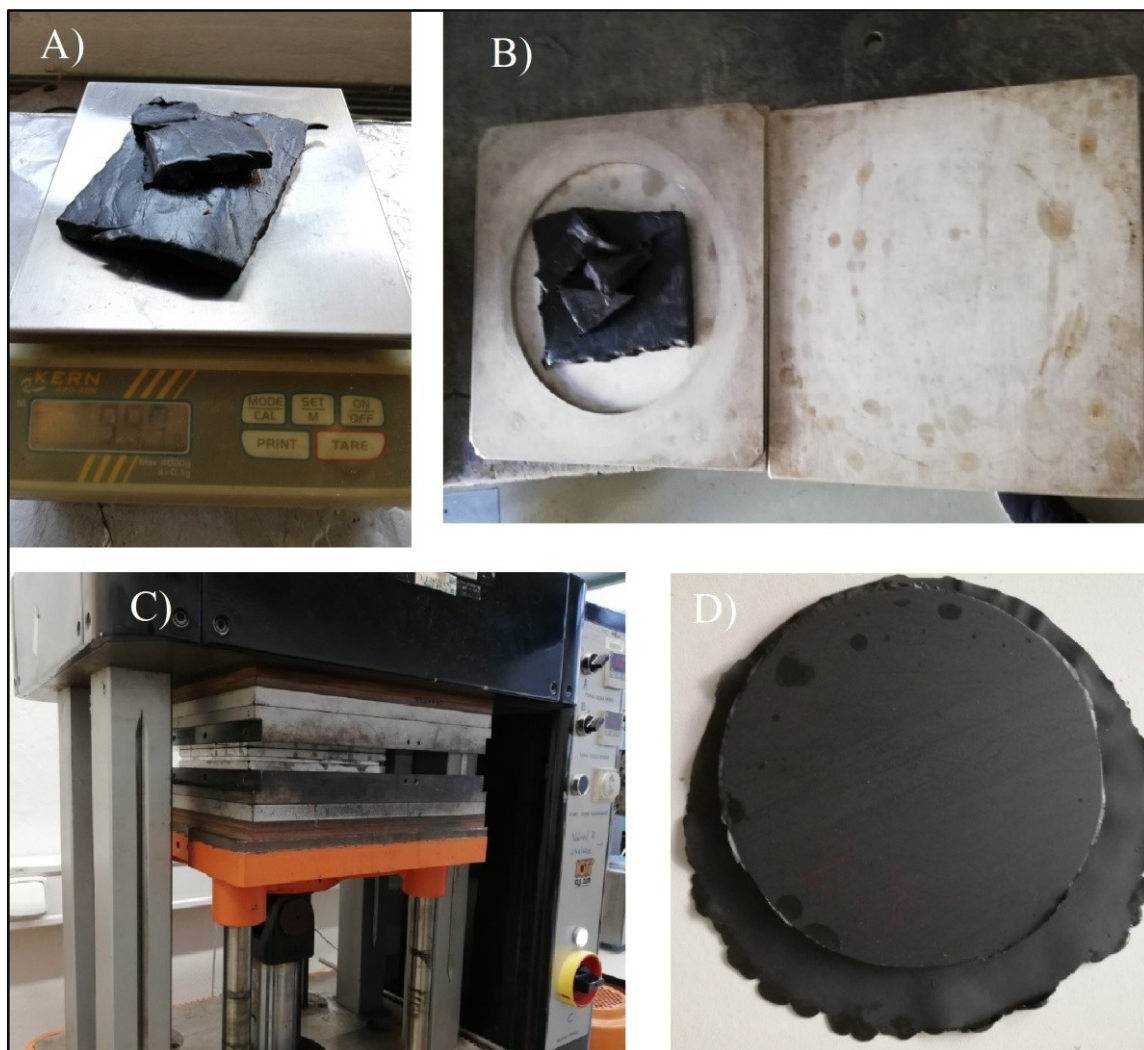
Nejsnazším a nejlevnějším způsobem, jak vyrobit v tomto případě pryžové desky je technologie lisování. Ta z hlediska vybavení vyžaduje: jednoduchou tvarovou formu, vyhřívaný lis a nástroje pro snadné dělení množství gumárenské směsi, nanášení separátoru a čištění formy.



*Obr. 32. Návrh lisovací formy (modré – uzavírací desky, šedá – tvarová deska)*

Forma je složená ze tří rovinných desek (*Obr. 32*), které byly vypáleny pomocí laseru z nerez oceli dle DIN 1.4301, a to z důvodu zvýšeného tepelného a chemického namáhání. Horní a spodní deska jsou silnější, aby přenesly axiální síly při uzavírání lisu a zamezily prohýbání v důsledku tlaku vulkanizované pryže. Tvarová deska má uprostřed kruhovou dutinu dle výrobku, zvětšenou o přídavek na smrštění, který činí necelá 3 %. Na místech, kde by byly rohy, jsou sražení. Usnadňují otevírání formy.

Postup lisování je následující.: Namíchaná gumárenská směs se nadělí v požadovaném množství a tvaru blízkém výrobku. Vloží se do předem vyhřáté formy opatřené separátorem (např. jelením mýdlem, roztokem thiosíranu sodného nebo siloxanové pryskyřice ve formě vodní emulze). Naplněná forma se vloží do lisu a několika zdvihy se odplyní. Poté se forma lisem uzavře a nechá požadovanou dobu pod určitým tlakem a teplotou, aby mohla proběhnout vulkanizace. Po této době se forma otevře, vyjme se výrobek, očistí se forma od zbytků pryže (pokud je špinavá) a nanese se separátorem. Celý výrobní cyklus se může opakovat. Po vychladnutí výrobku se oddělí přetoky a deska se zapráší.



Obr. 33. Vizualizace vybraných kroků během lisování pryžových desek (A – vážení naddělené směsi, B – vložení nálože do připravené formy, C – uzavření formy ve vyhřátém lisu, D – výrobek po vyjmutí z formy)

Pro výrobu pryžových desek byly zvoleny 3 různé směsi, viz Tab. 5. Pro tyto směsi bylo výrobcem stanoveno jednotné optimum vulkanizace 10 minut při 160 °C. Přičemž se přidává na každé 2 mm tloušťky desky 1 minuta vulkanizace navíc.

Tab. 5. Vybrané vlastnosti zvolených z vulkanizovaných směsí

Číslo směsi	Tvrdość [ShA]	Tažnosť [%]	Hustota $\rho_g$ [g/cm <sup>3</sup> ]
1	50	520	1,15
2	60	500	1,15
3	68,5	430	1,15

Aby došlo k úplnému zaplnění formy a dokonalému vylisování pryžové desky, je nutné spočítat hmotnost nálože.:

$$m_n = V \cdot \rho_g \cdot P = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \cdot \rho_g \cdot P \quad (18)$$

$$m_n = \frac{\pi \cdot 14,45^2}{4} \cdot 0,5 \cdot 1,15 \cdot 1,05 = 99 \text{ g}$$

kde:

- $m_n$  – hmotnost nálože [g]
- $V$  – objem dutiny formy [ $\text{cm}^3$ ]
- $\rho_g$  – hustota gumárenské směsi [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
- $P$  – přídavek na zaplnění formy [-]

Vypočtené množství nálože bylo vloženo do formy a vulkanizováno po následující dobu.:

$$T_v = T_{\text{opt.}} + \frac{s_{\text{výr.}}}{2} = 10 + \frac{5}{2} = 12,5 \text{ min} \quad (19)$$

kde:

- $T_v$  – doba vulkanizace [min]
- $T_{\text{opt.}}$  – optimum vulkanizace [min]
- $s_{\text{výr.}}$  – tloušťka výrobku [mm]

## 7.4 Návrh lisovníku

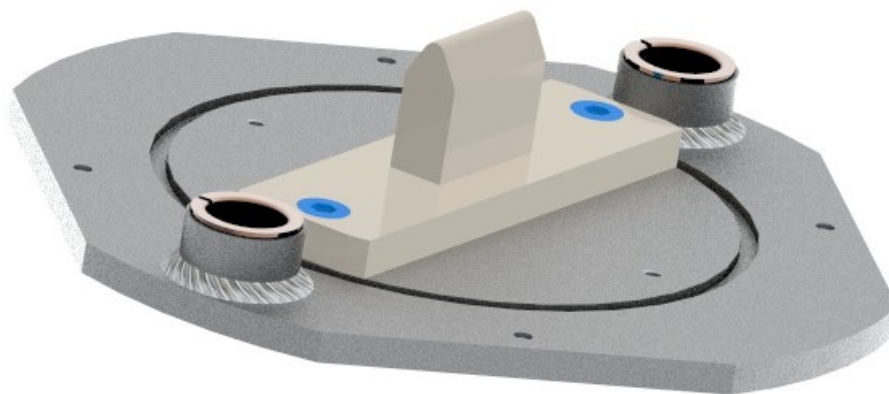
Lisovník je pevnou částí nástroje a udává konturu tvářenému dílci - plechu. Z ekonomického hlediska je možné tuto část nástroje vyrobit z levnějších materiálů (např. dřevo, pryskyřice), ovšem za předpokladu splnění jejich funkce. Tou je většinou provedení operace, vyrobení dílu a to v daném množství a v dané přesnosti. Součástí experimentu je zhotovení této části nástroje z umělého dřeva, konkrétně Ebaboard 0780, který se používá převážně pro modelářské účely. Aplikace zvoleného materiálu na tvářecí nástroje by mohla mít značný přínos. Materiál je snadno obrobitelný, pevný, levný a za pomoci CNC programování je možné nástroj vyrobit frézováním během krátkého časového intervalu v porovnání s běžnými nástrojovými (kovovými) materiály.

Tab. 6. Vybrané vlastnosti materiálu Ebaboard 0780

	Pevnost v tlaku	Pevnost v ohybu	Youngův modul pružnosti	Rázová houževnatost (Charpy)	Tvrдость Shore D	Hustota při 20 °C
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kJ·m <sup>-2</sup> ]	[ShD]	[g·cm <sup>-3</sup> ]
Ebaboard 0780	31 ± 2	33 ± 1	1662 ± 60	5,8 ± 0,2	67 ± 2	0,78 ± 0,02

Pro základní odzkoušení funkčnosti zařízení byl navržen jako lisovací nástroj ohybník do V o poloměru zaoblení špičky 3 mm a vrcholovém úhlu 60°, viz Obr. 34. Ten se bude upínat pomocí šroubů se zahlobenou hlavou k ocelové základové desce.

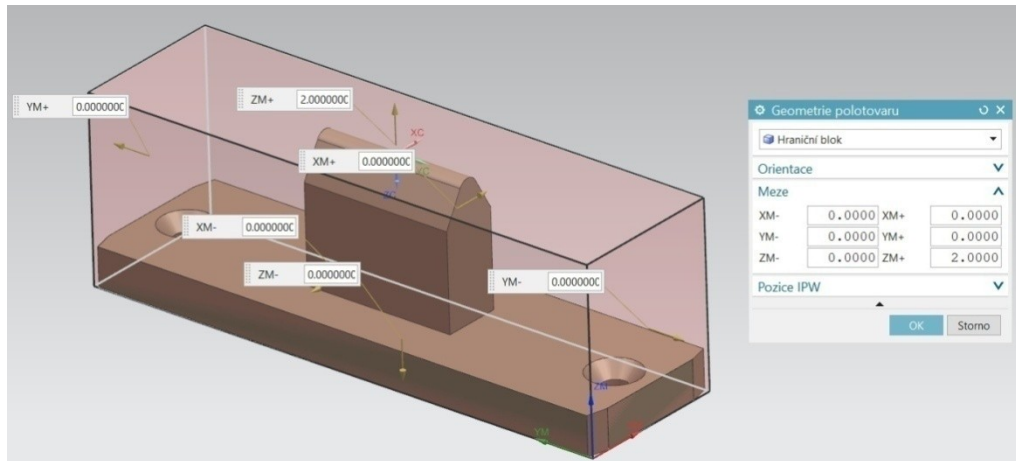
Sestava nástroje je uzpůsobena i pro tažení, ražení a další druhy plošného tváření. Lisovníky se dají měnit a podle způsobu tváření upnout k nepohyblivé či pohyblivé desce, stejně jako skříň s pryží.



Obr. 34. 3D model upnutého lisovníku (ohybníku) k pohyblivé základové desce

#### 7.4.1 Tvorba CAM programu

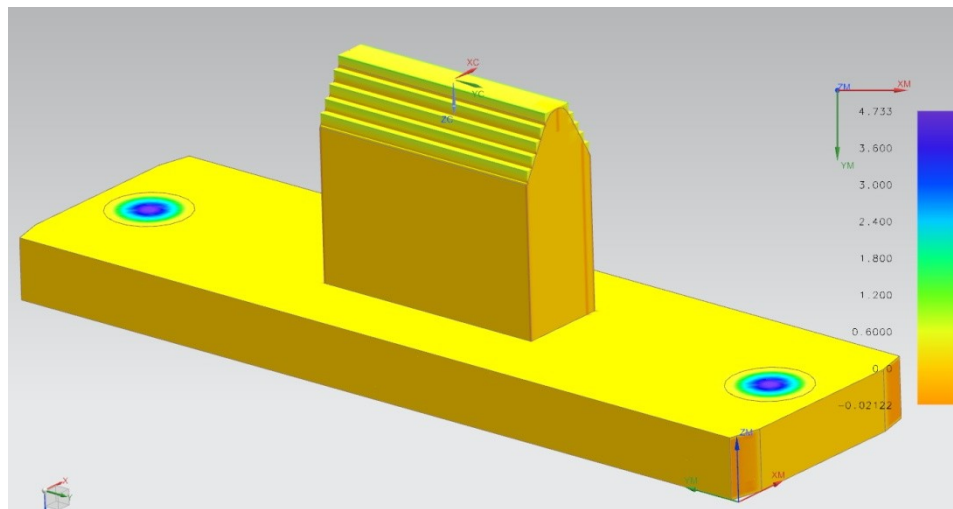
Geometrie ohybníku vytvořená v SolidEdge ST9 byla převedena do softwaru NX 12.0, kde v modulu obrábění byl vytvořen program pro frézování nástroje. V prvních krocích byl vytvořen polotovár a stanoven jeho nulový bod (Obr. 35). Byly nadefinovány nástroje z databáze.



Obr. 35. Určení polotovaru obrobku

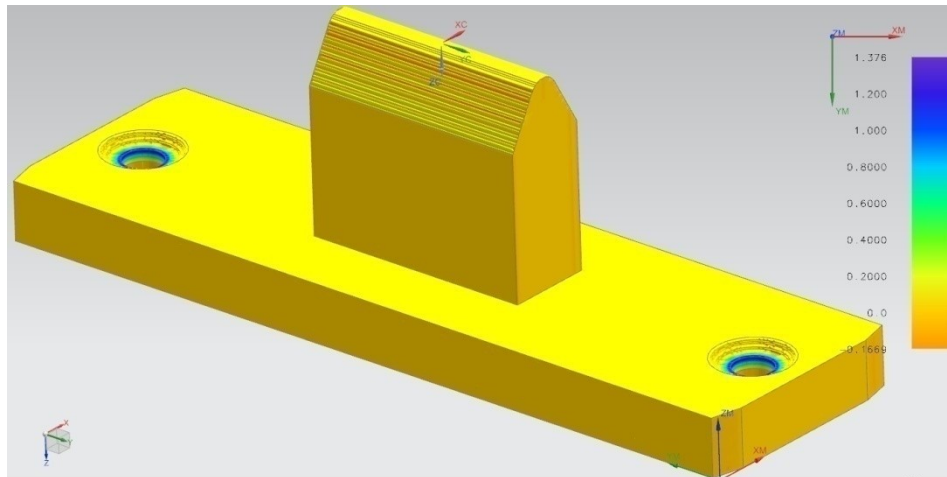
Materiál Ebaboard 0780 je možné frézováním zpracovávat řezy načisto, bez přídavků. Pro všechny dále popsané operace byla použita posuvová rychlost  $v_f = 2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a otáčky vřetene  $n_v = 10\,000 \text{ min}^{-1}$ .

V první operaci (Obr. 36) byla použita válcová čelní fréza o průměru  $d = 10 \text{ mm}$  k odebrání většiny přebytečného materiálu a vytvoření hrubé kontury ohybníku. Byla zde nastavena šířka záběru nástroje  $a_e = 5 \text{ mm}$  s maximální hloubkou řezu  $a_p = 2 \text{ mm}$ .



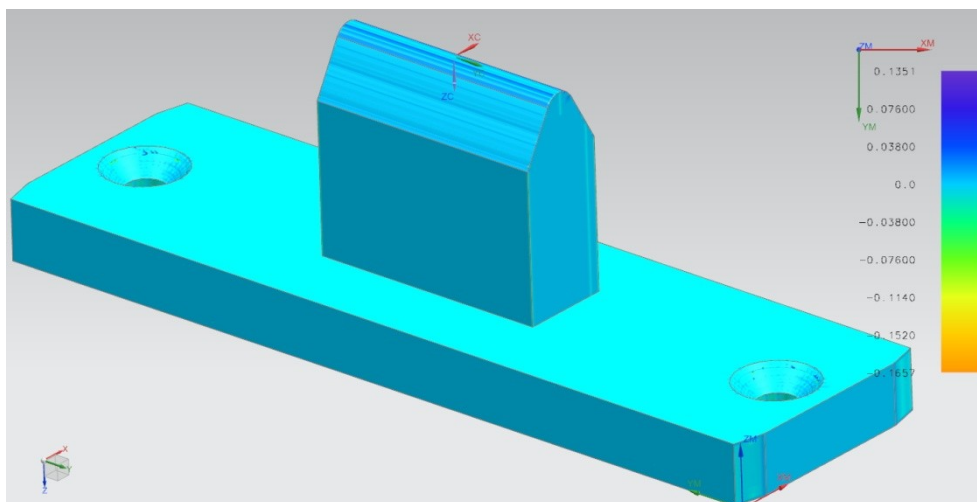
Obr. 36. Ohybník po první operaci

Druhou operací (Obr. 37) byla zpřesněna kontura tvářecí části ohybníku a byly vytvořeny otvory pro upnutí lisovníku. V této operaci byla použita rovněž válcová čelní fréza o průměru  $d = 6 \text{ mm}$ . V tomto kroku byla nastavena šířka záběru nástroje  $a_e = 1,2 \text{ mm}$  s maximální hloubkou řezu  $a_p = 0,2 \text{ mm}$ .



*Obr. 37. Ohybník po druhé operaci*

V poslední operaci (*Obr. 38*) byla použita kulová fréza o průměru  $d = 4 \text{ mm}$ . Byly dokončeny stěny v oblasti tvářecí části a zahloubení u děr. V této operaci byla nastavena šířka záběru nástroje  $a_e = 0,3 \text{ mm}$  s maximální hloubkou řezu  $a_p = 0,2 \text{ mm}$ .



*Obr. 38. Ohybník po poslední operaci*

Po vygenerování všech operací byla vždy pomocí 3D analýzy odhadnuta jakost povrchu po obrobení. Jakmile byl odhad drsnosti  $R_a$  optimální, byl vygenerován tzv. G-kód. Ten byl vložen do počítače frézky, podle kterého pracovala. Celková odhadovaná doba obrábění činila 17 minut a 6 vteřin. Ve skutečnosti byl výrobní čas delší, protože fréza stěží mohla dosáhnout maximální posuvové rychlosti, měnila-li směr dráhy.

## 7.5 Návrh lineárního vedení

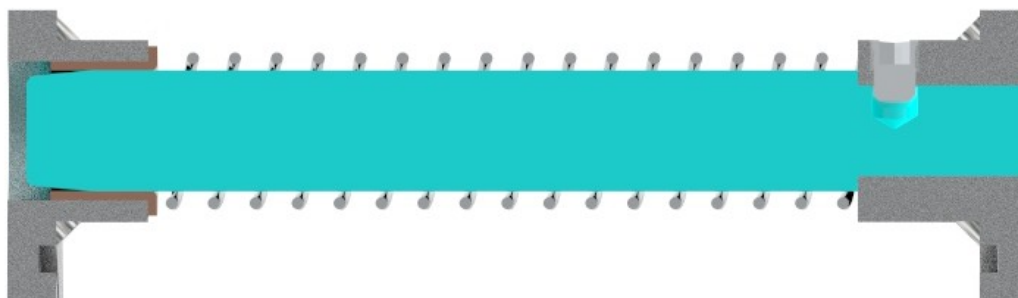
Lineární vedení je částí nástroje, jenž zajišťuje kinematiku mezi lisovníkem a lisovnicí. Udává tak rovněž přesnost lisování, protože zajišťuje nejen pohyb, ale i přesnou polohu mezi těmito dvěma prvky nástroje. Skládá se z vodícího trnu, kluzného ložiska a pružiny.

Vodící trn je obrobek ocelové válcové tyče. Z ekonomických důvodů byl vyroben z konstrukční oceli dle ČSN 11 373 (1.0036). Tvar je rozdělen na upínací část, vodící část a naváděcí část. Upínací část zajistí pevné a přesné uložení vodícího trnu k nepohyblivé základové desce pomocí opěrných ploch a stavěcího šroubu. Naváděcí část udává přesné vymezení polohy základových desek, po ní následující vodící část, jež zajišťuje přesný axiální posuv jednotlivých desek vůči sobě skrze kluzné ložisko.



Obr. 39. 3D model vodícího trnu

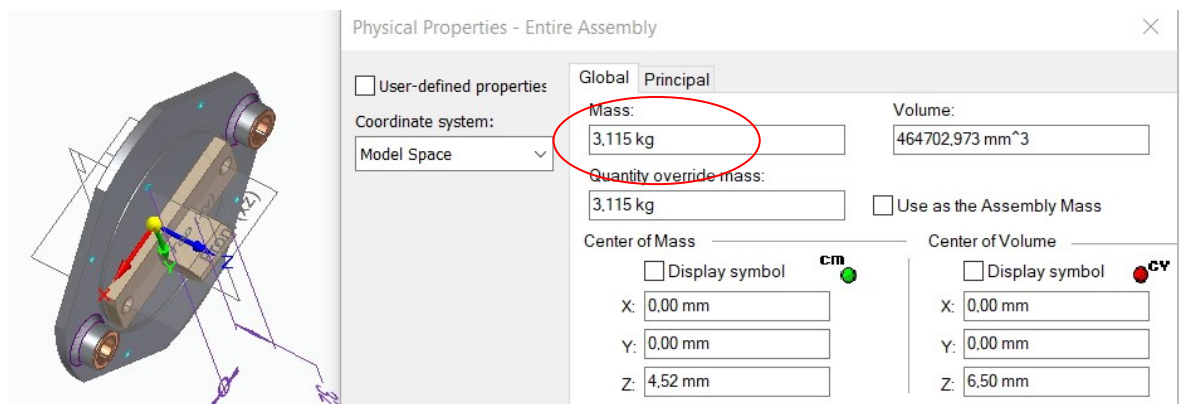
Kluzné ložisko poskytuje minimalizování tření mezi svým povrchem a povrchem vodícího trnu. Jelikož nástroj bude pracovat v nepříliš prašném prostředí bez nutnosti jakýchkoliv aditivních údržbových prvků jako je čištění a mazání, tak bylo zvoleno kluzné ložisko od firmy SKF a.s. s názvem přírubové kluzné pouzdro s kompozitem PTFE PCMF 202321.5. Ložisko je nalisováno s přesahem v pohyblivé základové desce.



Obr. 40. Řez sestavou lineárního vedení



Pružina slouží k návratu té části nástroje, jež je uložena nahoře do výchozí pracovní pozice. V této pozici je možné vložit do pracovního prostoru polotovár a po tváření jej z ní vyjmout. Pružina byla zvolena na základě známé hmotnosti nástroje uložené nahoře. Dle katalogu firmy Čermák s.r.o. byla vybrána pružina 2,00x26x140x19, které odpovídá hodnota stlačení taková, aby vytvořila bezpečný pracovní prostor. Výpočet stlačení byl proveden dle teorie vinutých pružin, viz [29]. Pro provedení výpočtu stlačení bylo nutné nejdříve zjistit hmotnost pohyblivé části nástroje. Pomocí softwaru SolidEdge ST9 byly vytvořeny modely jednotlivých komponentů nástroje, ke kterým byl přidělen náležitý materiál. Pomocí uvedených informací software vypočítal hmotnost, ta činila 3,115 kg, viz Obr. 41.



Obr. 41. Fyzikální vlastnosti pohyblivé části nástroje.

Na základě znalosti hmotnosti byla vypočtena gravitační síla pohyblivé části nástroje.

$$F_g = m \cdot g = 3,115 \cdot 9,81 = 30,558 \text{ N} \quad (20)$$

kde:

- $F_g$  – gravitační síla pohyblivé části nástroje [N]
- $m$  – hmotnost pohyblivé části nástroje [kg]
- $g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Tíha pohyblivé části nástroje je pak rovnoměrně rozložena na 2 pružiny, pro každou z nich platí, že hodnota stlačení je:

$$y = \frac{\partial A}{\partial F} = \frac{\partial}{\partial F} \left( \frac{4 \cdot F_p^2 \cdot D^3 \cdot i}{G \cdot d_p^4} \right) = \frac{8 \cdot F_p \cdot D^3 \cdot i}{G \cdot d_p^4} = \frac{8 \cdot \frac{F_g}{2} \cdot D^3 \cdot i}{G \cdot d_p^4} \quad (21)$$

$$y = \frac{4 \cdot 30,558 \cdot 26^3 \cdot 17}{81\,500 \cdot 2^4} = 28,008 \text{ mm}$$

kde:

- $y$  – stlačení pružiny [mm]
- $A$  – deformační práce [J]
- $F$  – síla [N]
- $F_p$  – síla v jedné pružině [N]
- $D$  – průměr závitu pružiny [mm]
- $i$  – počet činných závitů pružiny [ - ]
- $G$  – modul pružnosti ve smyku [MPa]
- $d_p$  – průměr drátu pružiny [mm]

Stlačením pružiny z  $L_0 = 140$  mm na cca  $L_s = 112$  mm je vytvořen dostatečný pracovní prostor pro manipulaci s tvářeným materiálem v nástroji. Pokud dojde k upravení pohyblivé části nástroje (např. záměna lisovníku a lisovnice), změní se hmotnost nástroje a i stlačení pružin. Pružina byla vybrána tak, aby byla použitelná pro širší interval zatížení.

## 8 VÝVOJ A VARIANTY NÁSTROJE

Nástroj prošel řadou konstrukčních úprav. Avšak funkcí byl podobný po celou dobu vývoje. Již od první verze bylo rozhodnuto např. o: kruhovém tvaru lisovnice, způsobu jejího upínání k deskám, použití pružin pro snadný návrat nástroje do výchozí polohy, prvcích z kterých bude skládat vedení nástroje atp.

### 8.1 Verze první

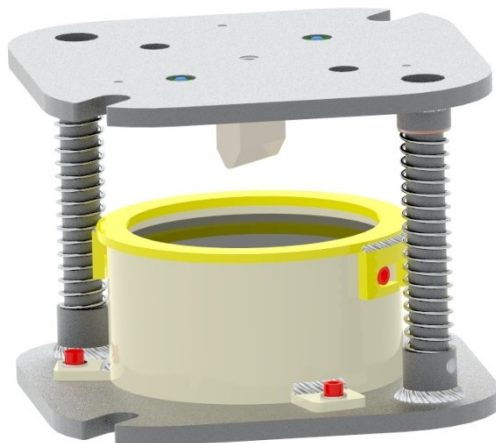
Návrh sloužil k první konzultaci a nebyl kompletně dokončen. Neodpovídají rozměry, aby nástroj mohl pracovat na požadovaném lisu. Bajonetové navyšování resp. snižování tažnice bylo zváženo za zbytečné. Komplikovalo to velikost zdvihu pružin. Čep vedení je ukotven v desce a nemá dostatečnou oporu, aby spolehlivě vedl horní část nástroje. Je zde složité a problematické upevnění ložisek. K pohyblivé desce je přišroubovaný trn do beranu lisu CDC 2 – 7, ten není k dispozici.



*Obr. 42. První návrh nástroje*

### 8.2 Verze druhá

Tato verze nástroje je již poměrně blízká finální. Liší se tvary desek, které jsou složitější. Je zde nevhodně vyřešeno upínání nástroje k pohyblivé desce. Je jiné i upínání kufru lisovnice. Byly řešeny problematické prvky z verze první. Není zde vyřešeno odvědušnění na stacionární desce. Současně je problém upínat jiné nástroje než ohybníky (tažníky, raznice reliéfů), protože ty je vhodnější upínat na nepohyblivou desku (resp. dolů), kvůli zafixování polotovaru, který má při těchto operacích tendenci sklouzávat a v poloze nahoře by snadno nedržel.

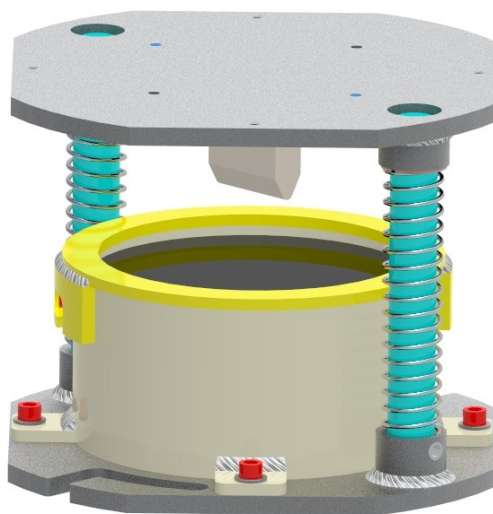


*Obr. 43. Druhý návrh nástroje*

### 8.3 Verze třetí

Jedná se o finální koncept nástroje. Jsou upraveny prvky zmíněny v předchozích verzích. Desky jsou vhodněji tvarované kvůli snazšímu opracování, jsou tenčí, aby byl nástroj lehčí a snáz se s ním manipulovalo. V deskách jsou zhotoveny závitové otvory pro upínání nástroje a nejsou průchozí jako v předchozí verzi, kde bylo nutné použít navíc matici. Do desky, ke které je upnuta lisovnice s pryží jsou dány stavěcí šrouby s plochým čelem, kde by jinak docházelo k opotřebení pryže. Pevnou část nástroje je možné připínat k pohyblivé i nepohyblivé desce.

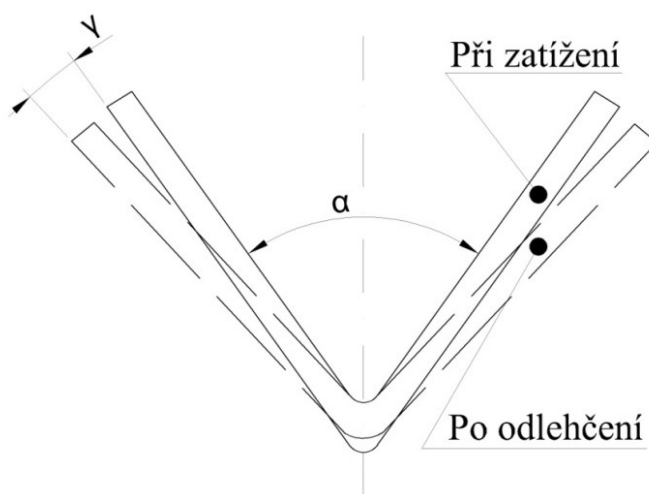
Tato verze nástroje byla zvolena jako konečná a přešlo se k její výrobě. Zakázkově vyráběné součásti stály 5 500 Kč, šrouby a pružiny stály 100 Kč, namíchané gumárenské směsi stály 300 Kč. Lisovací forma na pryžové desky stála 2850 Kč.



*Obr. 44. Třetí návrh nástroje*

## 9 EXPERIMENT – VLIV SPECIÁLNÍ OHYBNICE NA ODPRUŽENÍ PLECHU

Byl stanoven experiment, jehož cílem bylo zjistit, zdali má vliv na velikost odpružení ohýbaného plechu speciální ohybnice vůči normální, netvarované ohybnici. Pod pojmem speciální je míněno to, že ohybnice bude mít ve svém objemu dutiny takového tvaru, aby se teoreticky přizpůsobovala tvaru ohybníku, viz kap. 3.3 Zásady ohýbání plechů metodou Guerin.



Obr. 45. Vznik úhlu odpružení  $\gamma$  na výlisku

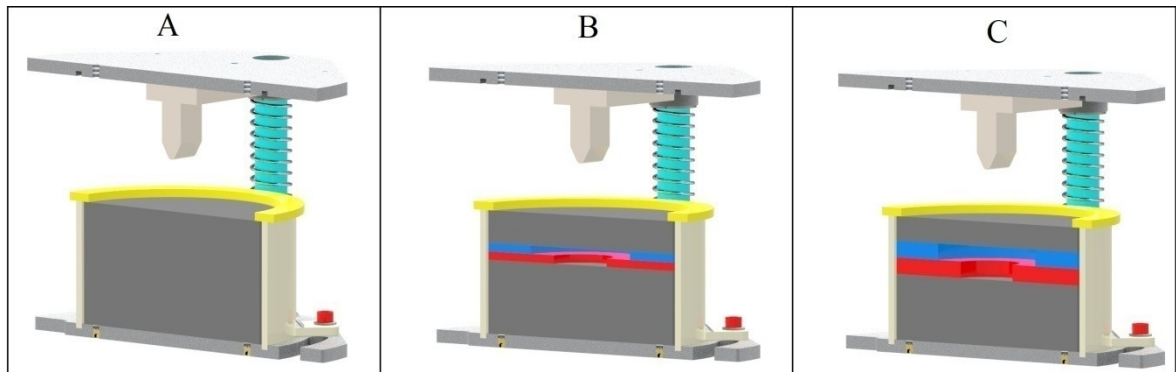
Zkoumán byl materiál o chemickém složení Cu 99,9 % dle EN CW004A v tloušťkách 0,5 mm a 0,3 mm. Další měřený materiál byl o chemickém Al 99,5% dle EN 1050, ten byl ohýbán v tloušťkách 0,5 mm a 2 mm.

Tab. 7. Mechanické vlastnosti testovaných materiálů

	Mez pevnosti v tahu	Mez kluzu	Tažnost	Tvrдость dle Vickerse
	$R_m$ [MPa]	$R_{e(0,2)}$ [MPa]	A [%]	HV [HV]
Cu 99,9 % - EN CW004A	235	100	33	65
Al 99,5% - EN 1050	100	85	12	30

Ohybník je do tvaru V o vrcholovém úhlu  $60^\circ$  a o poloměru zaoblení špičky 3 mm, je vyroben z materiálu Ebaboard 0780. Ohybnice byly tvarově uspořádány dle Obr. 46, kde v případě A je ohybnice bez tvarového uspořádání, v případě B je výška tvarové části 10 mm a v případě C je výška tvarové dutiny 20 mm. Tvarové uspořádání by mělo mít vliv na

působení tlaku na výlisek. V tomto případě je vytvořeno stejně vysokými pryžovými deskami, které mají uprostřed vyseknutý kruhový otvor. Černo-šedě vyobrazené desky otvor nemají, červené desky mají otvor o průměru 44 mm a modré desky mají otvor o průměru 75 mm.



*Obr. 46. Řez vedený středem sestavy nástroje s různě uspořádanou ohybnicí*

V následujících tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty úhlu ohybu  $\alpha$ , vypočteny úhly odpružení  $\gamma$ . K jednotlivým materiálům a tloušťkám je pak vypočten odhad aritmetického průměru výběrového souboru  $\bar{x}$ , odhad směrodatné odchylky aritmetického průměru  $s_{\bar{x}}$ , odhad nejistoty měření typu  $u_a$  a odhad variačního koeficientu  $v_{\bar{x}}$ . Měřený soubor  $n$  byl vždy o 10 kusech ohnutých plechů.

Úhel ohybu  $\alpha$  byl měřen nožovým optickým úhloměrem s lupou od firmy FWP (*Obr. 47*), jehož měřicí rozsah činí  $4 \times 90^\circ$  a jeden díl je  $0^\circ 05'$ .



*Obr. 47. Nožový optický úhloměr s lupou*

## 9.1 Naměřená a zpracovaná data

Tab. 8. Ohýbání plechů do V v netvarované ohybnici

n	Netvarovaná ohybnice							
	Cu; tl.: 0,5 mm		Al; tl.: 0,5 mm		Al; tl.: 2 mm		Cu; tl.: 0,3 mm	
	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]
1	66,33	3,17	63,92	1,96	62,92	1,46	64,17	2,09
2	65,92	2,96	63,83	1,92	62,67	1,34	64,00	2,00
3	66,08	3,04	63,83	1,92	62,50	1,25	63,58	1,79
4	66,17	3,09	63,75	1,88	63,33	1,67	63,33	1,67
5	66,17	3,09	63,25	1,63	62,58	1,29	64,08	2,04
6	66,17	3,09	63,83	1,92	62,75	1,38	63,75	1,88
7	66,25	3,13	63,67	1,84	62,17	1,09	63,83	1,92
8	66,42	3,21	63,75	1,88	62,83	1,42	63,92	1,96
9	66,50	3,25	63,92	1,96	62,75	1,38	64,25	2,13
10	66,75	3,38	63,50	1,75	63,00	1,50	64,00	2,00
$\bar{x}$	66,276	3,138	63,725	1,863	62,750	1,375	63,891	1,946
$s_{\bar{x}}$	0,235	0,118	0,208	0,104	0,311	0,155	0,279	0,140
$u_a$	0,074	0,037	0,066	0,033	0,098	0,049	0,088	0,044
$v_{\bar{x}}$ [%]	0,35	3,75	0,33	5,59	0,50	11,30	0,44	7,18

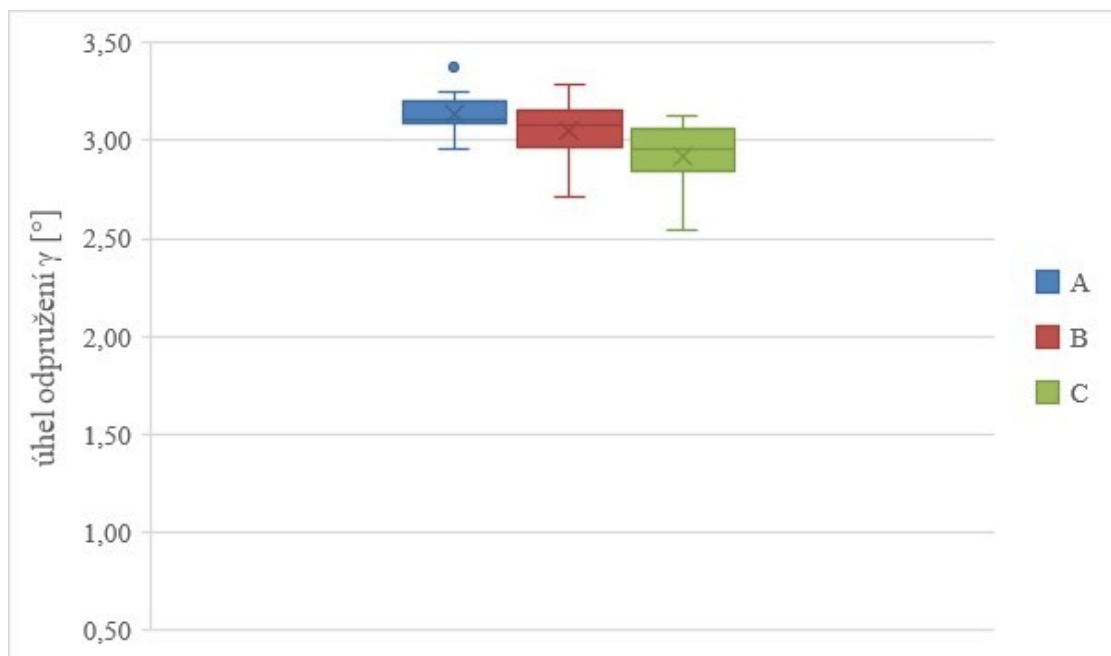
Tab. 9. Ohýbání plechů do V v tvarované ohybnici o výšce dutiny  $h = 10$  mm

n	Tvarovaná ohybnice s $h=10$ mm							
	Cu; tl.: 0,5 mm		Al; tl.: 0,5 mm		Al; tl.: 2 mm		Cu; tl.: 0,3 mm	
	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]
1	66,50	3,25	63,58	1,79	61,75	0,88	63,75	1,88
2	66,25	3,13	63,25	1,63	62,17	1,09	63,17	1,59
3	65,42	2,71	63,50	1,75	62,08	1,04	63,33	1,67
4	65,92	2,96	63,67	1,84	62,67	1,34	63,00	1,50
5	65,75	2,88	63,83	1,92	62,33	1,17	62,92	1,46
6	66,00	3,00	63,17	1,59	61,67	0,84	63,08	1,54
7	66,25	3,13	64,08	2,04	62,92	1,46	63,42	1,71
8	66,08	3,04	63,25	1,63	62,08	1,04	63,17	1,59
9	66,58	3,29	63,42	1,71	62,83	1,42	63,25	1,63
10	66,33	3,17	63,58	1,79	62,00	1,00	63,17	1,59
$\bar{x}$	66,108	3,054	63,533	1,767	62,250	1,125	63,226	1,613
$s_{\bar{x}}$	0,352	0,176	0,282	0,141	0,432	0,216	0,235	0,118
$u_a$	0,111	0,056	0,089	0,045	0,395	0,198	0,074	0,037
$v_{\bar{x}}$ [%]	0,53	5,76	0,44	7,99	0,69	19,21	0,37	7,30

Tab. 10. Ohýbání plechů do V v tvarované ohybnici o výšce dutiny  $h = 20$  mm

n	Tvarovaná ohybnice s $h=20$ mm							
	Cu; tl.: 0,5 mm		Al; tl.: 0,5 mm		Al; tl.: 2 mm		Cu; tl.: 0,3 mm	
	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\gamma$ [°]
1	65,92	2,96	62,75	1,38	63,67	1,84	63,00	1,50
2	66,25	3,13	62,58	1,29	63,33	1,67	63,25	1,63
3	65,92	2,96	63,00	1,50	65,25	2,63	62,75	1,38
4	66,17	3,09	62,75	1,38	63,08	1,54	62,33	1,17
5	66,00	3,00	63,08	1,54	63,17	1,59	62,83	1,42
6	66,17	3,09	62,92	1,46	63,58	1,79	62,67	1,34
7	65,08	2,54	63,08	1,54	62,75	1,38	62,92	1,46
8	65,67	2,84	62,67	1,34	63,83	1,92	63,08	1,54
9	65,75	2,88	62,83	1,42	63,75	1,88	62,50	1,25
10	65,42	2,71	62,25	1,13	63,92	1,96	62,58	1,29
$\bar{x}$	65,835	2,918	62,791	1,396	63,633	1,817	62,791	1,396
$s_{\bar{x}}$	0,367	0,184	0,255	0,127	0,679	0,339	0,282	0,141
$u_a$	0,116	0,058	0,081	0,040	0,215	0,107	0,089	0,045
$v_{\bar{x}}$ [%]	0,56	6,30	0,41	9,13	1,07	18,68	0,45	10,09

Na základě provedených měření (viz Tab.: 8, 9, 10) byly sestaveny následující grafy ukazující, jakým způsobem se měnil úhel odpružení plechů vybraných materiálů o různých tloušťkách v závislosti na typu ohybnice.

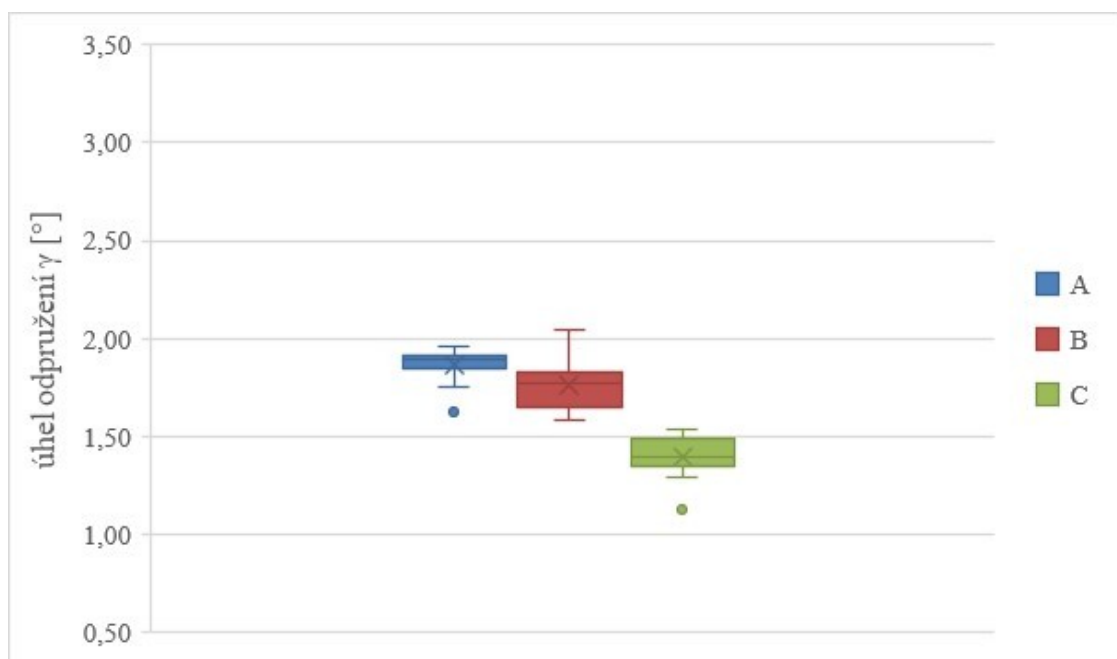


Obr. 48. Velikost úhlu odpružení v závislosti na typu ohybnice materiálu Cu 99,9 % s tloušťkou 0,5 mm (A – netvarovaná ohybnice, B – tvarovaná ohybnice s  $h = 10$  mm, C – tvarovaná ohybnice s  $h = 20$  mm)



Z Obr. 48 je patrné, že úhel odpružení  $\gamma$  u materiálu Cu 99,9 % o tloušťce 0,5 mm klesá s použitím přizpůsobivějších ohybnic. Vyobrazení dat je pro názornost provedeno metodou pěti čísel. Nejnižše nakreslenou čarou je naznačeno minimum, nad ní je první kvartil, následuje medián, poté třetí kvartil a nejvýše je položeno maximum. Samostatně ležící body mimo uvedenou oblast jsou vyhodnoceny jako odlehlé hodnoty. Křížkem je vyznačen aritmetický průměr.

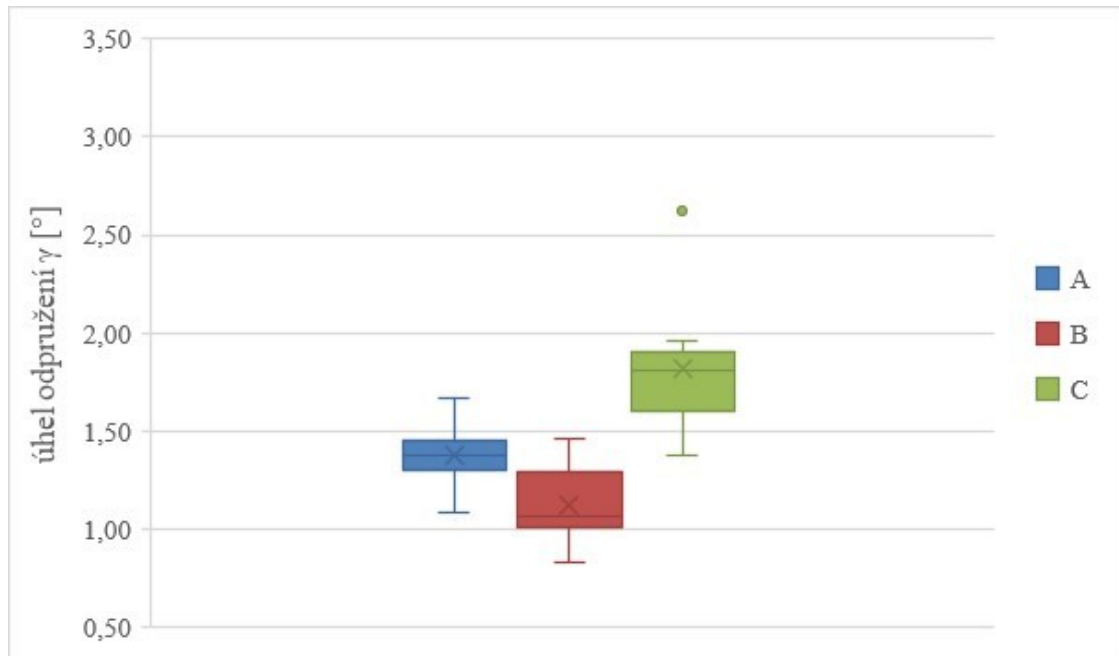
U netvarované ohybnice činí odhad aritmetického průměru výběrového souboru stanovených z 10 měření s odhadem směrodatné odchylky  $3,138 \pm 0,118^\circ$ , u tvarované ohybnice s hloubkou přizpůsobivé části 10 mm činí  $3,054 \pm 0,176^\circ$  a u tvarované ohybnice s hloubkou přizpůsobivé části 20 mm je  $2,918 \pm 0,184^\circ$ .



Obr. 49. Velikost úhlu odpružení v závislosti na typu ohybnice materiálu Al 99,5 % s tloušťkou 0,5 mm (A – netvarovaná ohybnice, B – tvarovaná ohybnice s  $h = 10$  mm, C – tvarovaná ohybnice s  $h = 20$  mm)

Z Obr. 49 je možné sledovat, že úhel odpružení  $\gamma$  u materiálu Al 99,5 % o tloušťce 0,5 mm klesá s použitím přizpůsobivějších ohybnic. Zobrazení naměřených dat je provedeno metodou pěti čísel. Nejnižše nakreslenou čarou je naznačeno minimum, nad ní je první kvartil, následuje medián, poté třetí kvartil a nejvýše je položeno maximum. Samostatně ležící body mimo uvedenou oblast jsou vyhodnoceny jako odlehlé hodnoty. Křížkem je vyznačen aritmetický průměr.

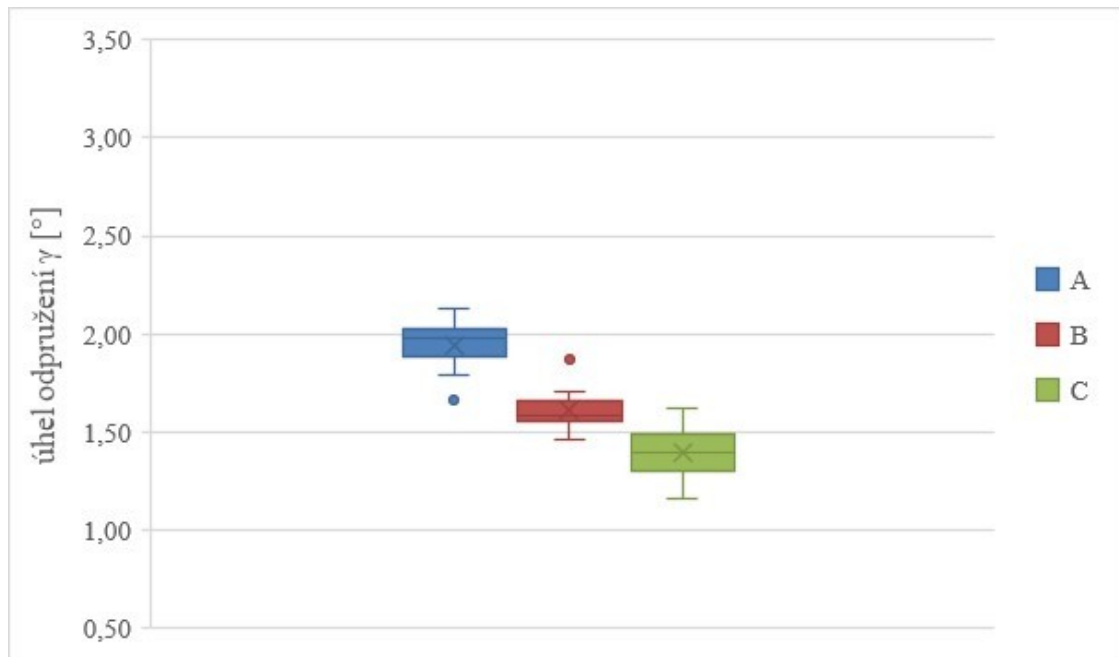
U netvarované ohybnice činí odhad aritmetického průměru výběrového souboru stanovených z 10 měření s odhadem směrodatné odchylky  $1,863 \pm 0,104^\circ$ , u tvarované ohybnice s hloubkou přizpůsobivé části 10 mm činí  $1,767 \pm 0,141^\circ$  a u tvarované ohybnice s hloubkou přizpůsobivé části 20 mm je  $1,396 \pm 0,127^\circ$ .



Obr. 50. Velikost úhlu odpružení v závislosti na typu ohybnice materiálu Al 99,5 % s tloušťkou 2 mm (A – netvarovaná ohybnice, B – tvarovaná ohybnice s  $h = 10$  mm, C – tvarovaná ohybnice s  $h = 20$  mm)

Z Obr. 50 je pozorovatelné, že úhel odpružení  $\gamma$  u materiálu Al 99,5 % o tloušťce 2 mm klesá s použitím přizpůsobivější ohybnice jen v rámci  $h = 10$  mm. U ohybnice s  $h = 20$  mm nedošlo ke snížení úhlu odpružení vzhledem k nepřizpůsobivé ohybnici, ba naopak byl větší. K zobrazení naměřených dat byla použita metoda pěti čísel. Nejnižší nakreslenou čarou je naznačeno minimum, nad ní je první kvartil, následuje medián, poté třetí kvartil a nejvýše je položeno maximum. Samostatně ležící body mimo zmíněnou oblast jsou vyhodnoceny jako odlehlé hodnoty. Křížkem je vyznačen aritmetický průměr.

U netvarované ohybnice činí odhad aritmetického průměru výběrového souboru stanovených z 10 měření s odhadem směrodatné odchylky  $1,375 \pm 0,155^\circ$ , u tvarované ohybnice s hloubkou přizpůsobivé části 10 mm činí  $1,125 \pm 0,216^\circ$  a u tvarované ohybnice s hloubkou přizpůsobivé části 20 mm je  $1,817 \pm 0,339^\circ$ .



Obr. 51. Velikost úhlu odpružení v závislosti na typu ohybnice materiálu Cu 99,9 % s tloušťkou 0,3 mm (A – netvarovaná ohybnice, B – tvarovaná ohybnice s  $h = 10$  mm, C – tvarovaná ohybnice s  $h = 20$  mm)

Z Obr. 51 je zřejmé, že úhel odpružení  $\gamma$  u materiálu Cu 99,9 % o tloušťce 0,3 mm klesá s použitím přizpůsobivějších ohybnic. Data jsou pro názornost zobrazena metodou pěti čísel. Nejnižše položenou čarou je naznačeno minimum, nad ní je první kvartil, následuje medián, poté třetí kvartil a nejvýše je položeno maximum. Samostatně ležící body mimo zmíněnou oblast jsou vyhodnoceny jako odlehlé hodnoty. Křížkem je vyznačen aritmetický průměr.

U netvarované ohybnice činí odhad aritmetického průměru výběrového souboru stanovených z 10 měření s odhadem směrodatné odchylky  $1,946 \pm 0,140^\circ$ , u tvarované ohybnice s hloubkou přizpůsobivé části 10 mm činí  $1,613 \pm 0,118^\circ$  a u tvarované ohybnice s hloubkou přizpůsobivé části 20 mm je  $1,396 \pm 0,141^\circ$ .

## 9.2 Diskuze výsledků experimentu

Podle grafického znázornění velikosti úhlu odpružení  $\gamma$  vybraných materiálů, je patrné, že Cu 99,9 % má větší úhel odpružení než Al 99,5 % při stejné tloušťce polotovaru. Materiál Al 99,5 % měnil úhel odpružení progresivněji než materiál Cu 99,9 %. Rovněž bylo prokázáno, že tvarově podobná, přizpůsobivá ohybnice má svůj význam ve tváření plechů. Působí příznivě na redukci úhlu odpružení, musí být ale ovšem určitých rozměrů vzhledem

k tloušťce polotovaru, síle a zdvihu lisu. Jako nevýhodu můžeme vidět nutnost většího zdvihu lisu (zanoření ohybníku), aby se plech začal ohýbat. Nejdříve se volně do vytvořené dutiny prohýbají rovné pryžové desky, které až později začnou deformovat plech samotný. Zvětšeným zanořením ohybníku je významně zhoršena možnost vizuální kontroly materiálu během tváření. Zatímco bez přizpůsobivé ohybnice lze celý proces kontrolovat.

V rámci materiálu Al 99,5 % o tloušťce 2 mm nedošlo k tak jednoznačnému výsledku, jako u předešlých dvou materiálů. Ukázalo se, že by bylo lepší, kdyby dutina v ohybnici byla tvořena z desek o menších průměrech a byla tvarově bližší konečnému výrobku. Docílilo by se usměrněnějšího tlaku na dílec a výsledky by mohly být podobné, jako u ostatních tří testovaných materiálů.

Přístupovalo-li by se k podobnému experimentu, navrhol bych vyrobiť dutinu v ohybnici tvarově bližší finálnímu výrobku. Kdyby se ve výrobě měly zpřesnit rozměry výrobků je použití přizpůsobivého nástroje jistě jednou z možností, jak toho docílit. Dále by bylo možné o úhel odpružení zmenšit ohybník nebo přiohnout plechy následně jiným způsobem.

## ZÁVĚR

V teoretické části práce byly popsány nekonvenční výrobní technologie ke tváření tenkých plechů nepevným prostředím včetně jejich nedostatků a předností. Byly zde ukázány i ilustrace pro lepší porozumění průběhu operací, či jejich nástrojovému vybavení. Zvláštní zřetel byl brán na co nejkomplexnější popis technologie Guerin, která byla následně vybrána do další pasáže práce na popis konstrukce nástroje. Tato část práce nastínila možný způsob řešení zařízení z hlediska operací, které na něm mají být prováděny.

Na základě tohoto textu byl v praktické části práce vytvořen univerzální tvářecí nástroj. U jednotlivých prvků nástroje je popsána jejich funkčnost a jsou zmíněny důvody pro jejich volbu. Ve stavbě nástroje se vyskytují součásti, jejichž funkčnost musela být ověřena uvedenými výpočty. Je popsána volba a postup výroby pryžových desek. Pro ohybník byl vytvořen CAM softwarem program pro jeho obrobení. Pomocí 3D CAD modelů byly vytvořeny výrobní výkresy i výkres sestavy, podle nichž byl nástroj vyroben a sestaven. Pro pochopení postupu tvorby nástroje byl popsán jeho vývoj do nynější podoby. V poslední kapitole byl sestaven experiment zkoumající vliv konstrukce nástroje na úhel odpružení plechů při ohýbání.

Ačkoliv se může zdát, že technologie užívající elastomery ke tváření v dnešní době ztrácejí na významu, tak by bez nich nemohlo dojít k vývoji sofistikovanějších tvářecích metod. Ovšem jedním z cílů práce bylo ukázat, že za nízké náklady se dá vyrobit zařízení, které zvládá většinu lisovacích operací a to pouhým přestavením nástroje. Spolehlivě a přesně pracuje, je vhodné pro malosériovou výrobu a má význam i v současnosti.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

[1] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173 s. ISBN 978-80-7454-471-2.

[2] LENFELD, Petr. *Technologie II*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7372-020-5.

[3] SMITH, David A. *Die design handbook (3rd edition)* [online]. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 1990 [cit. 2018-09-21]. ISBN 978-0-87263-375-9. Dostupné z:

[http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpDDHE0001/viewerType:toc//root\\_slug:die-design-handbook-3rd/url\\_slug:laminated-blank-die-construction](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpDDHE0001/viewerType:toc//root_slug:die-design-handbook-3rd/url_slug:laminated-blank-die-construction)

[4] CAMPBELL, F. C. *Metals fabrication: understanding the basics* [online]. Materials Park, Ohio: ASM International, 2013 [cit. 2018-09-21]. ISBN 978-1-62708-018-7. Dostupné z:

[http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMFUB000J/viewerType:toc//root\\_slug:metals-fabrication-understanding/url\\_slug:metals-fabrication-understanding](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMFUB000J/viewerType:toc//root_slug:metals-fabrication-understanding/url_slug:metals-fabrication-understanding)

[5] GUERIN, H. E. Method for cutting and forming sheet material [online]. 1935 [cit. 2018-09-21]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US2133445A/en#title>

[6] BOLJANOVIC, Vukota. *Metal shaping processes: casting and molding, particulate processing, deformation processes, and metal removal* [online]. New York: Industrial Press, 2010 [cit. 2018-09-21]. ISBN 978-0-8311-3380-1. Dostupné z:

[http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMSPCMPP1/viewerType:toc//root\\_slug:metal-shaping-processes/url\\_slug:metal-shaping-processes](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMSPCMPP1/viewerType:toc//root_slug:metal-shaping-processes/url_slug:metal-shaping-processes)

[7] BRALLA, James G. *Handbook of manufacturing processes: how products, components and materials are made* [online]. New York: Industrial Press, 2007 [cit. 2018-09-21]. ISBN 978-0-8311-3179-1. Dostupné z:

[http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHMPHPCM1/viewerType:toc//root\\_slug:handbook-manufacturing/url\\_slug:handbook-manufacturing](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHMPHPCM1/viewerType:toc//root_slug:handbook-manufacturing/url_slug:handbook-manufacturing)

[8] SALA, Giuseppe, 2001. A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies: part II — aluminium alloys rubber-forming. *Materials & Design* [online]. 22, 299–315 [cit. 2018-09-21]. ISSN 02613069.

Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306900000881>

[9] RAMEZANI, Maziar a Zaidi M RIPIN. *Rubber-pad forming processes: technology and applications* [online]. Philadelphia, PA: Woodhead Publishing, 2012 [cit. 2018-09-21]. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-094-2. Dostupné z:

htt-

[ps://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=D1xEAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=marform+forming+patent&ots=CuDBLgkE2x&sig=zsDzE-A9WUsxBUswVaJH7dMKISU&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=D1xEAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=marform+forming+patent&ots=CuDBLgkE2x&sig=zsDzE-A9WUsxBUswVaJH7dMKISU&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

[10] KUMAR, Abhishek, Santosh KUMAR, D R YADAV a I I T BHU, 2014. REVIEW OF RUBBER BASED SHEET HYDRO-FORMING PROCESSES [online]. (Aimtdr), 1–5 [cit. 2018-09-21]. Dostupné z:

<https://pdfs.semanticscholar.org/68ee/e42e180642e62b9d18f5824e7d2a9fab828a.pdf>

[11] BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet metal forming processes and die design* [online]. New York: Industrial Press, 2004 [cit. 2018-09-21]. ISBN 978-0-8311-3182-1. Dostupné z:

[http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSMFPDD0A/viewerType:toc//root\\_slug:sheet-metal-forming-processes/url\\_slug:stretch-forming](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSMFPDD0A/viewerType:toc//root_slug:sheet-metal-forming-processes/url_slug:stretch-forming)

[12] THIRUVARUDCHELVAN, S., 1993. Elastomers in metal forming: A review. *Journal of Materials Processing Tech.* [online]. 39(1–2), 55–82 [cit. 2018-09-21]. ISSN 09240136. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092401369390008T>

[13] M. Fakuda, K. Yamaguchi and K. Takayama, Deep drawing of circular sheet metals with rubber rings, 2nd Report, Bull. JSME [online]., 15 (1972) 555-561 [cit. 2018-09-21]. Dostupné z:

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme1958/15/82/15\\_82\\_554/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme1958/15/82/15_82_554/_pdf/-char/ja)

[14] M. Fakuda, K. Yamaguchi and K. Takayama, Deep drawing of circular sheet metals with rubber rings, 1st Report, Bull. JSME [online]., 15 (1972) 401-408 [cit. 2018-09-21]. Dostupné z:

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme1958/15/81/15\\_81\\_401/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme1958/15/81/15_81_401/_pdf/-char/en)

[15] ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA. *Sheet metal forming: Fundamentals* [online]. Materials Park, Oh: ASM International, 2012 [cit. 2018-09-21]. ISBN 978-1-61503-842-8. Dostupné z:

[http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSMFF0001/viewerType:toc//root\\_slug:sheet-metal-forming-fundamentals/url\\_slug:classification-description](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSMFF0001/viewerType:toc//root_slug:sheet-metal-forming-fundamentals/url_slug:classification-description)

[16] ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA. *Sheet metal forming: processes and applications* [online]. Materials Park, Oh: ASM International, 2012 [cit. 2018-09-21]. ISBN 978-1-61503-844-2. Dostupné z:

[http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSMFPA001/viewerType:toc//root\\_slug:sheet-metal-forming-processes-2/url\\_slug:sheet-metal-forming-processes-2](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSMFPA001/viewerType:toc//root_slug:sheet-metal-forming-processes-2/url_slug:sheet-metal-forming-processes-2)

[17] NOVOTNÝ, Jiljí. *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 227 s. ISBN 80-01-02351-6.

[18] PODANÝ, Kamil. *Problematika tváření elastomery*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. 53 s.

[19] ŠUBA, Oldřich. *Mechanické chování těles*. 5. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 101 s. ISBN 978-80-7318-907-5.

[20] ČADA, Radek. *Technologie tváření a slévání*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010, 78 s. ISBN 978-80-248-2273-0.

[21] *JB441 Concept Aircraft*. Jet Black Machine LLC [online]. © 2012 [cit. 2018-09-21]. Dostupné z: <http://www.jetblackaircraft.com/airplane>

[22] NOVOTNÝ, Josef. *Vybrané stati z tváření za studena*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 156 s.

[23] GORE s.r.o.: *katalog - Střihání a tváření s elastomery FIBROFLEX®* [online]. 2010 [cit. 2018-09-21]. Dostupné z:

[http://www.gore.cz/Katalog/2010/G\\_Elastomery.pdf](http://www.gore.cz/Katalog/2010/G_Elastomery.pdf)

[24] DVOŘÁK, Zdeněk a Jakub JAVOŘÍK. *Elastomerní konstrukční materiály*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárneská skupina Zlín, 2009, 93 s. ISBN 978-80-02-02155-1.

[25] LASCOE, O. D. *Handbook of FABRICATION PROCESSES* [online]. Materials Park, Oh: ASM International, 1998 [cit. 2018-09-21]. ISBN 0-87170-302-5.

Dostupné z:



htt-

ps://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=4PZxakNhjT0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=G.D.+ lascoe,+Handbook+of+Fabrication+Processes,+ASM+International,++1988&ots=kW8Aq11c\_i&sig=ZIsnopersBrkBhJNoJFHio--coc&redir\_esc=y#v=onepage&q&f=false

[26] DAVIS, J. R. *Metals handbook. Desk ed., 2nd ed* [online]. Materials Park, Oh.: ASM International, 1998 [cit. 2018-09-21]. ISBN 978-0-87170-654-6. Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMHDEE004/viewerType:toc//root\\_slug:metals-handbook-desk/url\\_slug:machines](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMHDEE004/viewerType:toc//root_slug:metals-handbook-desk/url_slug:machines)

[27] ŤÁK, Jan, SAMEK, Radko, BUMBÁLEK, Bohumil. *Speciální letecké technologie I. I. vyd.* Ediční středisko VUT Brno. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. 220 s. ISBN 80-214-0128-1.

[28] CMS Group. *Fuel Tank* [online]. 2017 [cit. 2018-09-21]. Dostupné z: <http://www.cmsspa.it/catalog/passenger-cars/turbo-air-inlet---hydroforming.html>

[29] VOLEK, František. *Základy pružnosti a pevnosti*. Vyd. 2. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2006, 157 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-7318-440-0.

[30] Sklostroj Turnov. *Technický pasport hydraulického dilenského a montážního lisu CDC 2 - 7*.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$T_r$	teplota rekystalizace
$T_t$	teplota tání
$K$	objemový modul pružnosti
$E$	Youngův modul pružnosti v tahu
$\nu$	Poissonův poměr
$s_p$	tloušťka polotovaru
$D_0$	průměr přístříhu
$m$	součinitel tažení
$D_1$	průměr průtažníku
$p$	potřebný tlak
$\sigma_{pt}$	mez pevnosti v tahu taženého materiálu
$r_{min}$	nejmenší poloměr ohybu
$F_C$	celková síla
$F_{tv}$	tvářecí síla
$F_f$	třecí síla
$F_e$	síla na změnu tvaru elastomeru
$b$	přesah přes okraj střížníku
$h$	výška střížníku
$\alpha_s$	zkos střížné hrany
$F_s$	střížná síla
$p_{char.}$	charakteristický tlak
$d_1$	děrovaný průměr
$\tau_{Rms}$	mez pevnosti ve smyku děrovaného materiálu
$R_i$	poloměr ohybu při zatížení

---

$R_f$	poloměr ohybu po odlehčení
$\sigma_k$	mez kluzu ohýbaného plechu
$T$	tloušťka materiálu
$\sigma_{pt}$	mez pevnosti v tahu materiálu
$h_{min}$	nejmenší prolisovaná hloubka
$p_H$	tlak přidržovače
$p_{kap.}$	tlak hydraulické kapaliny
$r_{min1}$	nejmenší zaoblení vyplněné plechem
$\sigma_{pt}$	pevnost v tahu materiálu
$k$	materiálová konstanta
$r_{max}$	největší poloměr ohybu
$R_e$	mez kluzu ohýbaného materiálu
$r$	skutečný poloměr ohybu
ÚVI	Ústav výrobního inženýrství
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
3D	troj-rozměrný
$p_L$	tlak v lisovnici
$F$	lisovací síla
$S_1$	plocha lisovnice
$S_2$	plocha lisovnice
$S_3$	plocha lisovnice
$N_t$	normálová síla v obvodu lisovnice
$R$	poloměr lisovnice
$s$	tloušťka stěny lisovnice

---

$\sigma_t$	tečné napětí ve stěně lisovnice
ČSN	Česká technická norma
DIN	Deutsches Institut für Normung
$m_n$	hmotnost nálože
$V$	objem dutiny formy
$\rho_g$	hustota gumárenské směsi
$P$	přídavek na zaplnění formy
$T_v$	doba vulkanizace
$T_{opt}$	optimum vulkanizace
$s_{výr.}$	tloušťka výrobku
CNC	Computer Numerical Control
$v_f$	posuvová rychlost
$n_v$	otáčky vřetene
$d$	průměr
$a_e$	šířka záběru nástroje
$a_p$	hloubkou řezu
$Ra$	střední aritmetická úchylka povrchu
$F_g$	gravitační síla pohyblivé části nástroje
$m$	hmotnost pohyblivé části nástroje
$g$	tíhové zrychlení
$y$	stlačení pružiny
$\partial$	parciální derivace
$A$	deformační práce
$F_p$	síla v jedné pružině
$D$	průměr závitu pružiny

---

$i$	počet činných závitů pružiny
$G$	modul pružnosti ve smyku
$d_p$	průměr drátu pružiny
$L_0$	délka v nezatíženém stavu
$L_s$	délka v částečně zatíženém stavu
$\alpha$	úhel ohybu
$\gamma$	úhel odpružení
$\bar{x}$	odhad aritmetického průměru výběrového souboru
$s_{\bar{x}}$	odhad směrodatné odchylky aritmetického průměru
$u_a$	odhad nejistoty měření typu a
$v_{\bar{x}}$	variační koeficient
$n$	počet prvků ve výběrovém souboru

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. A) Vliv zpevnění na mechanické vlastnosti materiálu [1], B) Vznik textury následkem tváření [2] .....	12
Obr. 2. Tahová křivka elastomeru [24] .....	15
Obr. 3. Schéma Guerinovy metody (a - před tažením, b - konec tažení, 1 – upínací trn, 2 – skříň, 3 – elastomer, 4 – přístřih plechu, 5 – tažník, 6 – ponorná deska, 7 – upínací deska, 8 – stůl lisu) [20] .....	16
Obr. 4. Výlisek technologie Guerin – příčná výztuha křídla letounu [21] .....	17
Obr. 5. Průběh stříhání elastomerem [2] .....	19
Obr. 6. Schéma výroby ohybu pomocí elastomeru (A – ohyb do V, B – vícenásobný ohyb) [12] .....	21
Obr. 7. Schéma vzniku odpružení [6] .....	22
Obr. 8. Grafické znázornění ohýbání vzhledem ke směru vláken (A – špatně, B – správně) [6] .....	22
Obr. 9. Schéma tažení technologií Marform (a – situace při vložení přístřihu, b – situace na konci tažení, 1 – elastomerní polštář, 2 – objímka, 3 – přístřih plechu, 4 – přidržovač, 5 – tažník) [20] .....	23
Obr. 10. Schéma tažení metodou Verson – Wheelon (a – situace při vložení přístřihu, b – situace na konci tažení) [15] .....	25
Obr. 11. Schéma tažení metodou SAAB [3] .....	26
Obr. 12. Schéma tažení metodou Verson – Hydroform (a – situace při vložení přístřihu, b – situace na konci tažení) [9] .....	27
Obr. 13. Schéma tažení metodou Maslennikov (A – uspořádání nástroje s tažnicí pod elastomerním prstencem, B – uspořádání nástroje s tažnicí nad elastomerním prstencem) [12] .....	28
Obr. 14. Vliv mazání na maximální hloubku tažení [14] .....	29
Obr. 15. Hydromechanicky vyrobená část palivové nádrže automobilu [30] .....	30
Obr. 16. Schéma výroby výlisku hydromechanický tažením s pevným tažníkem [25] .....	31
Obr. 17. Schéma Hydromechanického tažení s pevnou tažnicí [25] .....	32
Obr. 18. Zakružování elastomery (A – zakružování pásem z elastomeru, B – zakružování válcem obaleného elastomerem) [12] .....	33
Obr. 19. Způsob uchycení elastomeru v kufru tvarovým způsobem [3] .....	35

Obr. 20. Schéma použití brzdy a fixačních kolíků pro operaci stříhání elastomerem (A – situace před stříháním, B – situace během stříhání) [3] .....	36
Obr. 21. A - Použití odlišné geometrie brzdy pro stříhání než v obr. 20, B – kombinace stříhání a tažení [3] .....	37
Obr. 22. Možné provedení střížného nástroje [23] .....	37
Obr. 23. Příklady prováděných ohýbacích operací za použití elastomerových těles a jiných speciálních prvků [12] .....	38
Obr. 24. Koncept ochranného bloku [3] .....	40
Obr. 25. Schéma zobrazení tváření konkrétního plechu (A – přes tvárník: vhodné řešení, B – do tvárnice: nevhodné řešení) [3] .....	41
Obr. 26. Pomocné konstrukční prvky nástroje k zdokonalení lisování [3] .....	41
Obr. 27. Hydraulický lis CDC 2 - 7 .....	45
Obr. 28. 3D model nepohyblivé základové desky .....	46
Obr. 29. 3D model pohyblivé základové desky .....	47
Obr. 30. 3D model lisovnice upnuté k nepohyblivé základové desce .....	47
Obr. 31. Výpočtové schéma zatížení lisovnice (A – náhled na situaci v celém objemu dutiny lisovnice, B – pohled) .....	48
Obr. 32. Návrh lisovací formy (modré – uzavírací desky, šedá – tvarová deska) .....	50
Obr. 33. Vizualizace vybraných kroků během lisování pryžových desek (A – vážení nadělené směsi, B – vložení nálože do připravené formy, C – uzavření formy ve vyhřátém lisu, D – výrobek po vyjmutí z formy) .....	51
Obr. 34. 3D model upnutého lisovníku (ohybníku) k pohyblivé základové desce .....	53
Obr. 35. Určení polotovaru obrobku .....	54
Obr. 36. Ohybník po první operaci .....	54
Obr. 37. Ohybník po druhé operaci .....	55
Obr. 38. Ohybník po poslední operaci .....	55
Obr. 39. 3D model vodícího trnu .....	56
Obr. 40. Řez sestavou lineárního vedení .....	56
Obr. 41. Fyzikální vlastnosti pohyblivé části nástroje .....	57
Obr. 42. První návrh nástroje .....	59
Obr. 43. Druhý návrh nástroje .....	60
Obr. 44. Třetí návrh nástroje .....	60
Obr. 45. Vznik úhlu odpružení $\gamma$ na výlisku .....	61

Obr. 46. Řez vedený středem sestavy nástroje s různě uspořádanou ohybnicí .....	62
Obr. 47. Nožový optický úhломěr s lupou.....	62
Obr. 48. Velikost úhlu odpružení v závislosti na typu ohybnice materiálu Cu 99,9 % s tloušťkou 0,5 mm (A – netvarovaná ohybnice, B – tvarovaná ohybnice s h = 10 mm, C – tvarovaná ohybnice s h = 20 mm) .....	64
Obr. 49. Velikost úhlu odpružení v závislosti na typu ohybnice materiálu Al 99,5 % s tloušťkou 0,5 mm (A – netvarovaná ohybnice, B – tvarovaná ohybnice s h = 10 mm, C – tvarovaná ohybnice s h = 20 mm) .....	65
Obr. 50. Velikost úhlu odpružení v závislosti na typu ohybnice materiálu Al 99,5 % s tloušťkou 2 mm (A – netvarovaná ohybnice, B – tvarovaná ohybnice s h = 10 mm, C – tvarovaná ohybnice s h = 20 mm) .....	66
Obr. 51. Velikost úhlu odpružení v závislosti na typu ohybnice materiálu Cu 99,9 % s tloušťkou 0,3 mm (A – netvarovaná ohybnice, B – tvarovaná ohybnice s h = 10 mm, C – tvarovaná ohybnice s h = 20 mm) .....	67



**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Hodnoty tlaku přidržovače $p_H$ pro vybrané materiály [22] .....	24
Tab. 2. Hodnoty konstant $k$ : vybrané materiály [22].....	39
Tab. 3. Vybrané technické údaje hydraulického lisu CDC 2 - 7 .....	45
Tab. 4. Požadované vlastnosti v závislosti na typu technologie [3], [22].....	49
Tab. 5. Vybrané vlastnosti zvolených zvulkanizovaných směsí .....	51
Tab. 6. Vybrané vlastnosti materiálu Ebaboard 0780.....	53
Tab. 7. Mechanické vlastnosti testovaných materiálů .....	61
Tab. 8. Ohýbání plechů do V v netvarované ohybnici .....	63
Tab. 9. Ohýbání plechů do V v tvarované ohybnici o výšce dutiny $h = 10$ mm .....	63
Tab. 10. Ohýbání plechů do V v tvarované ohybnici o výšce dutiny $h = 20$ mm .....	64

## SEZNAM PŘÍLOH

### Tištěné:

- I. Výkres č.: 05-A3-001/GUERIN; KRYT LISOVNICE
- II. Výkres č.: 21-A3-002/GUERIN; LISOVACÍ DESKA
- III. Výkres č.: 01-A3-001/GUERIN; NEPOHYBLIVÁ ZÁKLADOVÁ DESKA
- IV. Výkres č.: 08-A4-001/GUERIN; OBVODOVÁ ÚCHYTKA
- V. Výkres č.: 25-A4-001/GUERIN; OHYBNÍK
- VI. Výkres č.: 02-A3-001/GUERIN; POHYBLIVÁ ZÁKLADOVÁ DESKA
- VII. Výkres č.: 00-A3-001/GUERIN; SESTAVA
- VIII. Výkres č.: 09-A3-001/GUERIN; SKŘÍŇ LISOVNICE
- IX. Výkres č.: 16-A4-001/GUERIN; SPOJNÍK
- X. Výkres č.: 20-A3-002/GUERIN; TVAROVÁ DESKA
- XI. Výkres č.: 15-A3-001/GUERIN; VÍKO VÝPALEK
- XII. Výkres č.: 04-A3-001/GUERIN; VODÍCÍ TRN
- XIII. Výkres č.: 03-A3-001/GUERIN; ZÁKLADOVÁ DESKA VÝPALEK A
- XIV. Výkres č.: 12-A3-001/GUERIN; ZÁKLADOVÁ DESKA VÝPALEK B

### CD:

#### Adresář VÝKRESY:

- I. Výkres č.: 05-A3-001/GUERIN; KRYT\_LISOVNICE.dwg
- II. Výkres č.: 21-A3-002/GUERIN; LISOVACÍ\_DESKA.dwg
- III. Výkres č.: 01-A3-001/GUERIN; NEPOHYBLIVÁ\_ZÁKLADOVÁ\_DESKA.dwg
- IV. Výkres č.: 08-A4-001/GUERIN; OBVODOVÁ\_ÚCHYTKA.dwg
- V. Výkres č.: 25-A4-001/GUERIN; OHYBNÍK\_R3\_ALPHA60.dwg
- VI. Výkres č.: 02-A3-001/GUERIN; POHYBLIVÁ\_ZÁKLADOVÁ\_DESKA.dwg
- VII. Výkres č.: 00-A3-001/GUERIN; SESTAVA.dwg
- VIII. Výkres č.: 09-A3-001/GUERIN; SKŘÍŇ\_LISOVNICE.dwg

IX. Výkres č.: 16-A4-001/GUERIN; SPOJNÍK.dwg

X. Výkres č.: 20-A3-002/GUERIN; TVAROVÁ DESKA.dwg

XI. Výkres č.: 15-A3-001/GUERIN; VÍKO VÝPALEK.dwg

XII. Výkres č.: 04-A3-001/GUERIN; VODÍCÍ\_TRN.dwg

XIII. Výkres č.: 03-A3-001/GUERIN; ZÁKLADOVÁ\_DESKA\_VÝPALEK\_A.dwg

XIV. Výkres č.: 12-A3-001/GUERIN; ZÁKLADOVÁ\_DESKA\_VÝPALEK\_B.dwg

**Adresář CAD:**

I. din\_916-m6x6-45h.par

II. HORNÍ\_DÍL.par

III. HORNÍ\_DÍL\_SVAŘENEC.asm

IV. KLUZNÉ\_LOŽISKO.par

V. LINEÁRNÍ\_VEDENÍ.par

VI. LISOVNÍK.par

VII. LISOVNÍK-LOGA.par

VIII. LISOVNÍK-VZORKY.par

IX. NÁBOJ\_1.par

X. NÁBOJ\_2.par

XI. OBVODOVÁ\_ÚCHYTKA.par

XII. OHYBNIK\_R1,5\_ALPHA30.par

XIII. OHYBNIK\_R3\_2xALPHA87.par

XIV. OHYBNIK\_R3\_2xALPHA90.par

XV. OHYBNIK\_R3\_ALPHA30.par

XVI. OHYBNIK\_R3\_ALPHA45.par

XVII. OHYBNIK\_R3\_ALPHA60.par

XVIII. OHYBNIK\_R3\_ALPHA90.par

XIX. OHYBNIK\_R3\_ALPHA120.par

XX. PAR1.par

XXI. plech ohnutý R3-alpha60.psm

XXII. plech rovny.psm

XXIII. PODLOŽKA-B6.par

XXIV. PRUZINA\_2x26x140x19.par

XXV. PRUZINA\_2x26x140x19\_mir.par

XXVI. PRYŽOVÁ\_DESKA\_TL5\_D139,4.par

XXVII. PRYŽOVÁ\_DESKA\_TL5\_D139,4-DUTINA MALA.par

XXVIII. PRYŽOVÁ\_DESKA\_TL5\_D139,4-DUTINA VELKA.par

XXIX. SESTAVA TAŽNICE\_2.asm

XXX. SESTAVA.asm

XXXI. SESTAVA\_LISOVNÍK.asm

XXXII. SPODNÍ DÍL.asm

XXXIII. SPOJNÍK.par

XXXIV. SPOJNÍK-POLOTOVAR.par

XXXV. STAVĚCÍ\_ŠROUB.par

XXXVI. STAVĚCÍ\_ŠROUB\_M6x8.par

XXXVII. ŠROUB\_M6\_VALC\_HLAVOU.par

XXXVIII. ŠROUB\_M6\_VALC\_HLAVOU\_13.par

XXXIX. ŠROUB\_M6\_VALC\_HLAVOU\_15.par

XL. ŠROUB\_M6\_VALC\_HLAVOU\_15\_2.par

XLI. ŠROUB\_ZAPUSTNY\_M6x11,25.par

XLII. ŠROUB\_ZAPUSTNY\_M6x18.par

XLIII. ŠROUB\_ZAPUSTNY\_M6x20.par

XLIV. ŠROUB\_ZAPUSTNY\_M6x25.par

XLV. TAŽNÍK\_TALÍŘEK.par

XLVI. ZÁKLADOVÁ\_DESKA\_2.par

XLVII. ZÁKLADOVÁ\_DESKA\_3.par

XLVIII. ZAKLADOVA\_DESKA\_LISOVNÍK\_SVAŘENEC.asm

XLIX. ZAKLADOVA\_DESKA\_SVAŘENEC.asm

**Adresář CAM:**

I. LISOVNÍK-VZORKY\_par\_2.prt

II. OHYBNÍK.prt

**Adresář TEXT\_BP:**

I. GRUNT\_BP\_GUERINOVA\_METODA\_TVÁŘENÍ\_PLECHŮ.docx

II. GRUNT\_BP\_GUERINOVA\_METODA\_TVÁŘENÍ\_PLECHŮ.pdf