



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH NÁSTROJE PRO TVÁŘENÍ KUŽELOVÝCH PROLISŮ V AUSTENITICKÉM NEREZOVÉM PLECHU

A DESIGN OF THE DIE FOR CREATION OF CONIC PRESS IN THE AUSTHENITIC INOX

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL ŠLOSŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK LIDMILA, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Michal Šlosr

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

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

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

Návrh nástroje pro tváření kuželových prolisů v austenitickém nerezovém plechu

v anglickém jazyce:

A design of the die for creation of conic press in the austenitic inox

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro zvětšení plochy tepelného výměníku (sluneční záření – voda) je nutné navrhnout lisovací nástroj vytvářející v ploše plechu (austenitická nerez síly 0,5 mm) síť kónických prolisů. U navržené varianty budou provedeny praktické zkoušky výroby a jejich vyhodnocení. Vzhledem k ověřování bude použito tváření nepevným nástrojem.

Cíle diplomové práce:

Práce bude obsahovat rozbor současného stavu a variantní řešení možností výroby prolisů se zhodnocením jejich vhodnosti a nevhodnosti. Pro zvolenou technologii bude provedena aktuální literární studie, následovat bude návrh zkušebního nástroje doložený nezbytnými technologickými a kontrolními výpočty. Součástí řešení bude i návrh průmyslově využitelné technologie výroby prolisů, technické hodnocení a závěr.

Cílem je využít teoretické znalosti o tváření materiálů pro návrh konkrétního nástroje pro vytváření prolisů.

Seznam odborné literatury:

1. HELLWIG, W. und E. SEMLINGER. Spanlose Fertigung: Stanzen. 5th ed. Braunschweig Wiesbaden: Friedr Vieweg Verlagsgesellschaft mbH, 1994. 289 p. ISBN 3-528-44042-2.
2. FOREJT, Milan. Teorie tváření a nástroje. 1. vyd. Nakladatelství VUT v Brně. Brno: Rekrorát Vysokého učení technického v Brně, 1991. 187 s. ISBN 80-214-0294-6.
3. NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1992. 186 s. ISBN 80-214-0401-9.
4. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
5. ROMANOVSKIJ, Viktor Petrovič. Příručka pro lisování za studena. 2. vyd. Praha: SNTL, 1959. 540 s. DT 621.986.
6. FREMUNT, P., J. KREJČÍK a T. PODRÁBSKÝ. Nástrojové oceli (odborná kniha). 1. vyd. Brno: Dům techniky. 1994. 230 s.
7. TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE. Hluboké tažení plechu na lisech. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. 200 s. ISBN 80-03-00221-4
8. KOTOUČ, Jiří, et al. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Praha: Vydavatelství CVUT, 1993. 349 s. ISBN 80-01-01003-1.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 19.10.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

ŠLOSŘ Michal: Návrh nástroje pro tváření kuželových prolisů v austenitickém nerezovém plechu

Práce se zabývá řešením nástroje, který vytvoří kuželové prolisy v nerezovém plechu 17 240 (X5CrNi18-10). Na úvod jsou popsány možné technologie výroby se zaměřením na využití nepevného nástroje. Pro realizaci je vybrána metoda Guerin. Pevný tažník je nahrazen nepevným nástrojem (pryží/polyuretanem). Na závěr je provedeno vyhodnocení vlivu nepevného nástroje, maziva a odvědušnění.

Klíčová slova

Metoda Guerin, kuželové prolisy, nerezový plech 17 240, ztenčení plechu.

ABSTRACT

ŠLOSŘ Michal: A design of the die for creation of conic press in the austhenitic inox

The thesis deals with a design of the tool that creates the conic press in the austhenitic inox 17 240 (X5CrNi18-10). In the first part are described the possible production technologies with a focus of non rigid tool. For the realization is chosen the Guerin process. The rigid tool is replaced by non rigid tool (rubber / polyurethane). In a final part is performed an evaluation of the influence of non rigid tool, lubricants and venting.

Key words

Method of Guerin, conic press, austhenitic inox 17 240, sheet thinning

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠLOSŘ, Michal. *Návrh nástroje pro tváření kuželových prolisů v austenitickém nerezovém plechu*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

Prohlášení

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

Datum

.....

Michal Šlosr

Poděkování

Děkuji tímto panu doc. Ing. Zdeňku Lidmilovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	
Prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
1 ÚVOD	8
2 SOUČASNÝ STAV	9
2.1 Návrh zlepšení	10
3 MOŽNOSTI VÝROBY	12
3.1 Metoda Guerin	12
3.2 Metoda Marform	13
3.3 Metoda Hidraw	14
3.4 Metoda Hydroform	14
3.5 Metoda Verson-Wheelon	15
3.6 Hydromechanické tažení	16
3.7 Plošné superplastické tváření	17
3.8 Explozivní tažení kovů	19
3.9 Využití výbuchu plynu	20
3.10 Elektrohdraulické impulsní tváření	21
3.11 Magnetickoimpulsní tváření	22
3.12 Shrnutí	23
4 TAŽENÍ NEPEVNÝM NÁSTROJEM	24
4.1 Tažení pomocí metody Guerin	24
4.2 Tažení pomocí elastického bloku	26
4.3 Tření a mazání	27
4.4 Úvod do membránové teorie	28
4.5 Analýza vydutí prolisu	29
4.6 Charakteristika elastomerů	32
5 NÁVRH VÝROBY SOUČÁSTI	39
5.1 Materiál polotovaru	39
5.2 Návrh nástroje	40
5.3 Výpočet tvářecí síly a ztenčení plechu	44
5.3.1 Výpočet celkové tvářecí síly F_C	44
5.3.2 Ztenčení plechu	45
5.4 Vlastní tažení	46
5.5 Vyhodnocení	47
5.5.1 Ověření výpočtových vztahů	53
5.6 Zhodnocení	55
5.7 Návrh postupu výroby pro průmyslové využití	56
5.7.1 Výroba pomocí nepevného nástroje v České republice	58
ZÁVĚR	60
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých zkratk a symbolů	
Seznam příloh	

1 ÚVOD [4], [31]

Dílce vyráběné plošným tvářením dnes tvoří velký objem zakázek především v leteckém a automobilovém průmyslu, kde dochází ke stále narůstajícímu množství výroby.

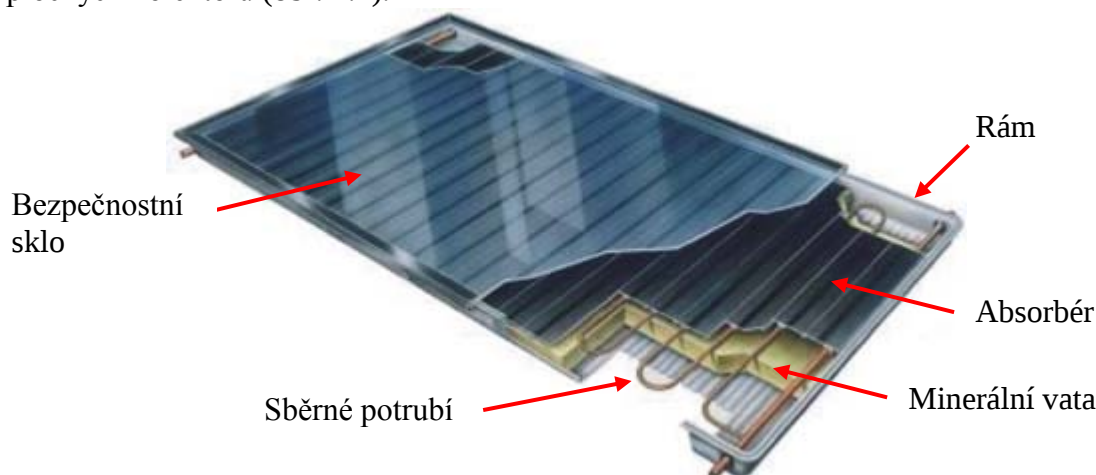
Velké požadavky při výrobě jsou kladeny na kvalitu, provedení a cenu dílců. Proto jsou hledána nová řešení vedoucí ke snížení nákladů výroby při zachování kvality výrobku. Mezi operace spadající do plošného tvářením patří i tažení, u kterého je možné nahrazení pevného nástroje nástrojem nepevným a to buď ve formě pryže/polyuretanu nebo kapaliny. Tímto řešením se dosáhne značné finanční úspory a snížení výrobního času tažidla.



Obr. 1.1 Produkty tvářením nepevným nástrojem [17]

2 SOUČASNÝ STAV [7], [32]

Nástroj, který bude navržen v této práci, slouží ke zvětšení teplosměnné plochy absorberu solárního kolektoru. Tedy zařízení, které je určeno pro ohřev vody vlivem působení sluneční energie. Velká část používaných kolektorů se řadí do skupiny plochých kolektorů (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Solární kolektor [24]

Trvanlivost solárních kolektorů je ovlivněna správnou volbou materiálu a jeho zpracováním. Životnost je dána zejména odolností absorberu vůči korozi a také jeho povrstvením.

Mezi nejčastěji volené materiály absorberu se řadí ocel, měď a hliník. Výhody a nevýhody těchto materiálů jsou uvedeny v tab. 2.1.

Tab. 2.1 Používané materiály absorberů [7]

Materiál	Výhody	Nevýhody
Ocel	Cena, dobře zpracovatelná.	Těžká, menší tepelná vodivost.
Nerezová ocel	Bez nebezpečí koroze, velmi vysoká životnost.	Drahá, těžká, menší tepelná vodivost.
Měď	Velmi dobrá tepelná vodivost, dobře zpracovatelná, odolná korozi, vysoká životnost.	Drahá.
Hliník	Lehký, dobrá tepelná vodivost, cena.	Ohrožen korozí.

Druhy absorberů

- Lamelový - skládá se z měděné trubky a absorpční lamely.
- Deskový - z oceli nebo mědi se zalisovaným systémem trubek.
- Polštářový - z běžné nebo nerezové oceli.
- Válcovaný - z hliníkového plechu.

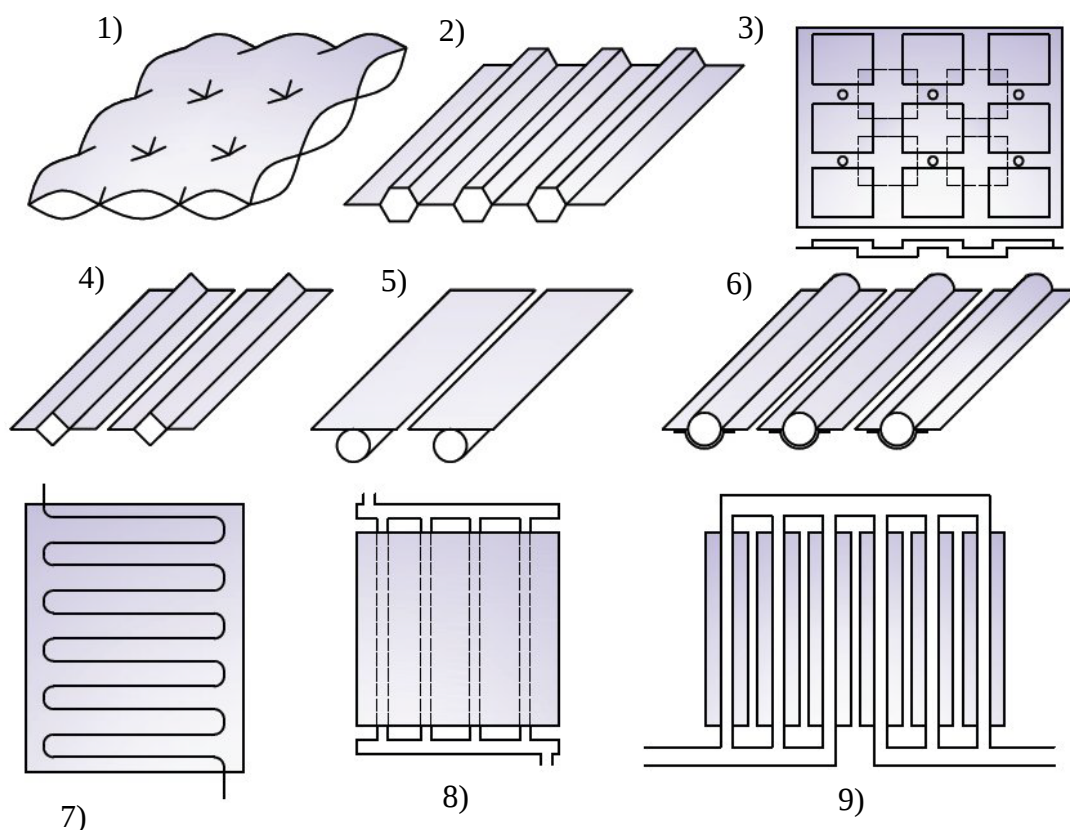
Hlavní funkcí absorberu je přeměna slunečního záření na teplo a jeho následný přechod do teplotnosného média.

Nejrozšířenější jsou lamelové absorbéry. Spojení mezi trubkou a lamelou je zajištěno svařováním (ultrazvukovým, laserovým, atd.), zalisováním nebo letováním. Ve spoji nesmí vzniknout žádné vzduchové bubliny. Výkonnost kolektoru je ovlivněna převodem tepla mezi trubkou a lamelou absorbérů.

Nejlepší převod tepla mezi absorbérům a nosičem tepla je dosažen u polštářových absorbérů. Nevýhodou však je malá odolnost vůči tlakovému zatížení a jejich hmotnost (přibližně $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, oproti (2 až 7) $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ u lamelových absorbérů).

Na obr. 2.2 jsou uvedeny příklady konstrukcí absorbérů s popisem.

- 1) polštářový kolektor z bodově svařených plechů (ocelové a nerezové plechy),
- 2) válcovaný hliníkový absorbér s úzkými průtočnými kanálky,
- 3) bodově svařený absorbér,
- 4) lamelový absorbér s vylisovanými kanálky (měď, hliník),
- 5) lamelový absorbér s přivařenou trubkou (měď),
- 6) lamelový absorbér ovitý plechem, bodově svařený (měď),
- 7) serpentínový absorbér s navařeným meandrem (měď),
- 8) deskový absorbér s trubkovým registrem,
- 9) trubkový registr s jednotlivými lamelami.



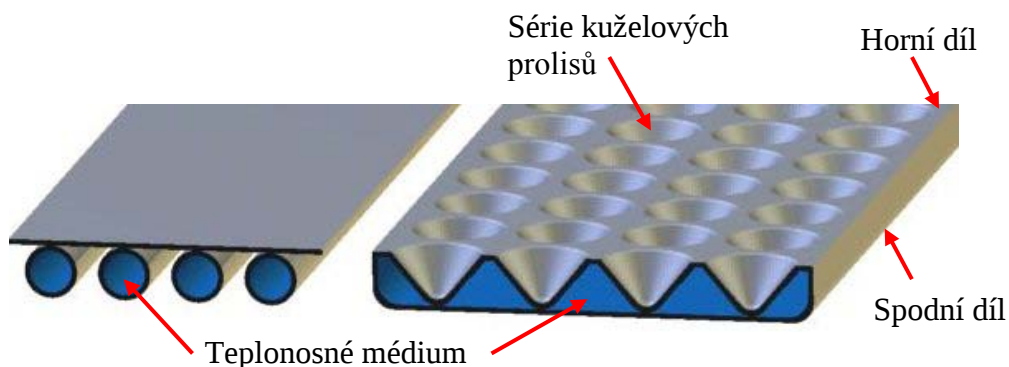
Obr. 2.2 Konstrukční řešení absorbérů [7]

2.1 Návrh zlepšení [32]

Nynější řešení absorbérů odpovídá schématu na obr. 2.3a. Tato konstrukce absorbérů má však nedostatky v podobě nutnosti kolmého dopadu slunečního záření

na absorbér a špatného přestupu absorbovaného tepla mezi lamelou a potrubím (malá styčná plocha).

Pro zvýšení účinnosti solárního kolektoru je navržen absorbér (obr. 2.3b), který bude tvořen horním a spodním dílem. Díly budou po obvodu svařeny laserem. Horní díl bude obsahovat sérii kuželových prolisů blíže nespecifikovaných rozměrů. Prolisy by měly sloužit ke zvětšení teplosměnné plochy a rovněž potlačit potřebu kolmého dopadu slunečního záření na absorbér.



Obr. 2.3a Lamelový absorbér s přivařeným potrubím [7]

Obr. 2.3b Vylepšený absorbér se strukturovaným povrchem

Cílem práce je navrhnout nástroj, kterým se vytvoří už zmíněné prolisy v plechu o tloušťce 0,5 mm. Jedná se o prototypovou výrobu.

Materiál plechu je austenitická chromniklová nerezová ocel 17 240 (X5CrNi18-10). Tato ocel má velmi dobrou odolnost proti korozi. Je ji možné velmi dobře vyleštit na vysoký lesk. Má vynikající tažnost za studena. Svařitelnost je dobrá. Dlouhodobě ji lze vystavit působení teplot do 350°C. Používá se v potravinářském a chemickém průmyslu, ve zdravotnictví a architektuře.

Chemické složení materiálu je uvedeno v tab. 2.2. V tab. 2.3 jsou uvedeny základní mechanické charakteristiky vyplývající z tahové zkoušky uvedené v kapitole 5.1.

Tab. 2.2 Chemické složení oceli 17 240 [33]

C [hm. %]	Cr [hm. %]	Ni [hm. %]	Mn [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]	Si [hm. %]
max. 0,07	17,0-20,0	9-11,5	max. 2	max. 0,045	max. 0,03	max. 1

Tab. 2.3 Mechanické charakteristiky oceli 17 240

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	291 MPa
Mez pevnosti R_m	700 MPa
Tažnost A	50 %

3 MOŽNOSTI VÝROBY [5], [10], [14], [15], [16], [18], [19], [26], [29]

Pro dobrou funkci navrženého tvaru absorbéru se předpokládá, že dostačující hloubka potřebných prolisů v horním plechu se bude pohybovat kolem 5 mm. Jako optimální varianta pro vytváření takovýchto prolisů v tenkém plechu s dobrou tažností se jeví využití nepevného nástroje.

V této části budou představeny možné technologie výroby, a to následovně:

Tváření tlakem elastomeru

- metoda Guerin,
- metoda Marform,
- metoda Hidraw.

Tváření tlakem kapaliny

- metoda Hydroform,
- metoda Verson-Wheelon,
- hydromechanické tažení.

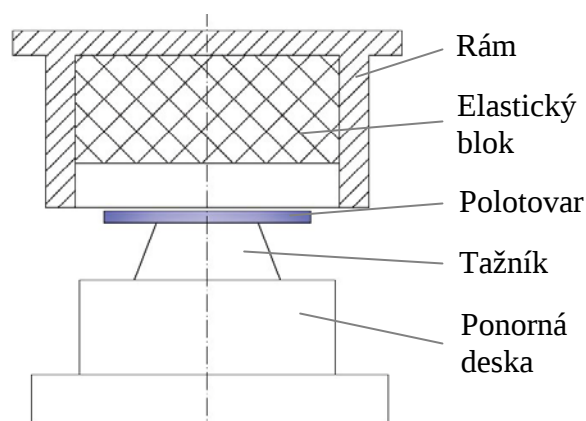
Tváření tlakem plynu

- plošné superplastické tváření.

Tváření vysokou rychlostí deformace

- explozivní tažení kovů,
- využití výbuchu plynu,
- elektrohydraulické impulsní tváření,
- magnetickoimpulsní tváření.

3.1 Metoda Guerin [14], [19], [26]



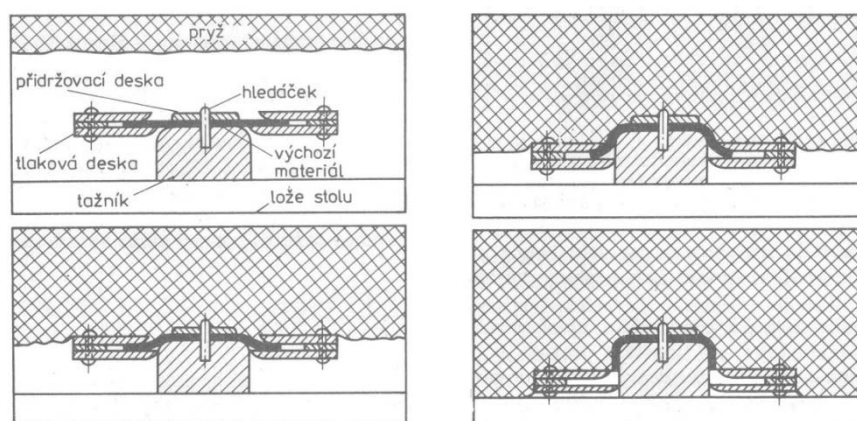
Obr. 3.1 Schéma metody Guerin [14]

Nejstarší metoda tažení s využitím pryžového nástroje (obr.3.1). Tažnice je tvořena elastickými bloky, které jsou pevně uloženy v dutině ocelové desky. Deska je upevněna k beranu lisu upínací stopkou. K tažení se obvykle používají hydraulické lis. Celková výška bloků pryže je přibližně $\frac{3}{4}$ celkové hloubky dutiny ocelové desky, což umožňuje dostatečné vedení mezi horní a spodní částí nástroje. Životnost nástroje je nízká. Výhodou je

kvalita povrchu, pryž nezanechává na povrchu žádné stopy.

Využívá se pro různé druhy stříhání, ohýbání a mělké tažení, kde je plech tažen zeslabováním své tloušťky. V případě, kdy tímto způsobem táhneme výtažky větší hloubky, dochází ke zvlnění plechu.

Zvlnění je mimo jiné způsobeno tlakem pryže, který nedosáhne dostatečně rychle velikosti potřebné k eliminaci zvlnění. Tlak stoupá vnikáním spodní části tažidla s přístřihem do pryže, přičemž přesahující část přístřihu není přidržována. Důsledkem toho se na okraji přístřihu začnou tvořit vlnky. Částečně tomu lze předejít použitím přidržovače dle obr. 3.2.



Obr. 3.2 Využití přidržovače u metody Guerin [14]

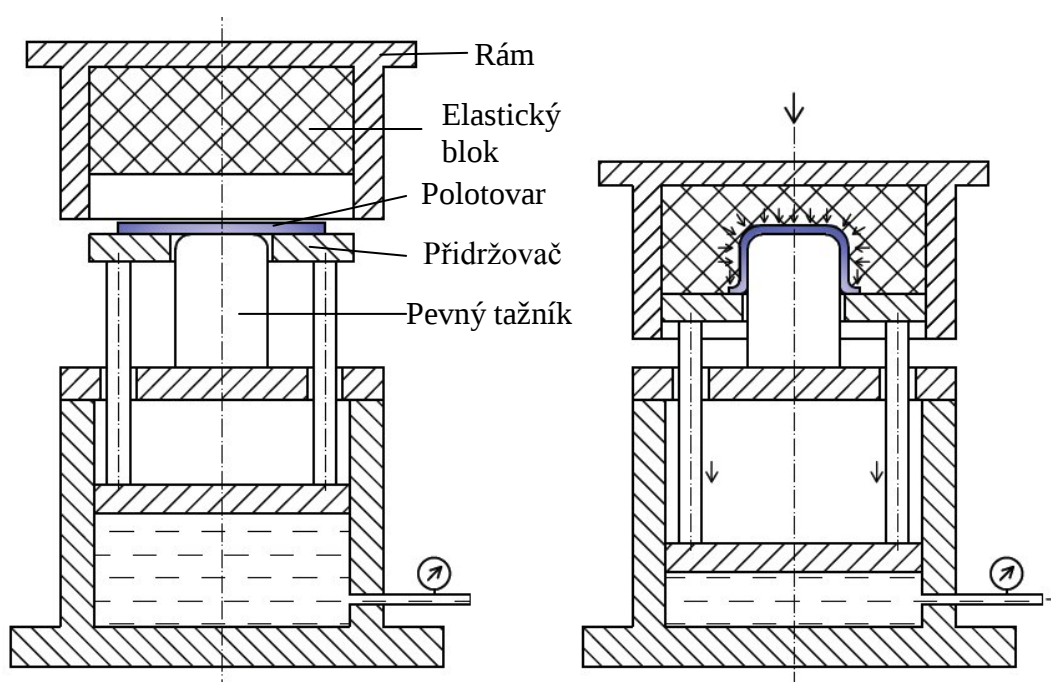
3.2 Metoda Marform [14], [19], [26]

Metoda (obr. 3.3) je vhodná i pro hluboké tažení ocelových a neželezných plechů. Využívá přidržovač, který je ovládán hydraulicky. Přítlačná síla přidržovače je regulována v závislosti na zdvihu pomocí mechanické vazby přepouštěcím ventilem.

Tažení probíhá tak, že po vložení přístřihu na desku přidržovače začne horní část nástroje sestupovat, působí tlakem na přístřih a stlačuje přidržovač podepíraný pístem, přičemž se přístřih táhne na požadovaný tvar. Tlak v pryži během tažení stoupá na (40 až 50) MPa.

Výška pryže by měla být minimálně 3x větší, než je výška výlisku. Předem se tím rychlému opotřebení a ztrátě elasticity pryže.

Pořizovací cena i požadovaný výrobní čas tažidla je podstatně nižší než při použití klasického způsobu tažení.



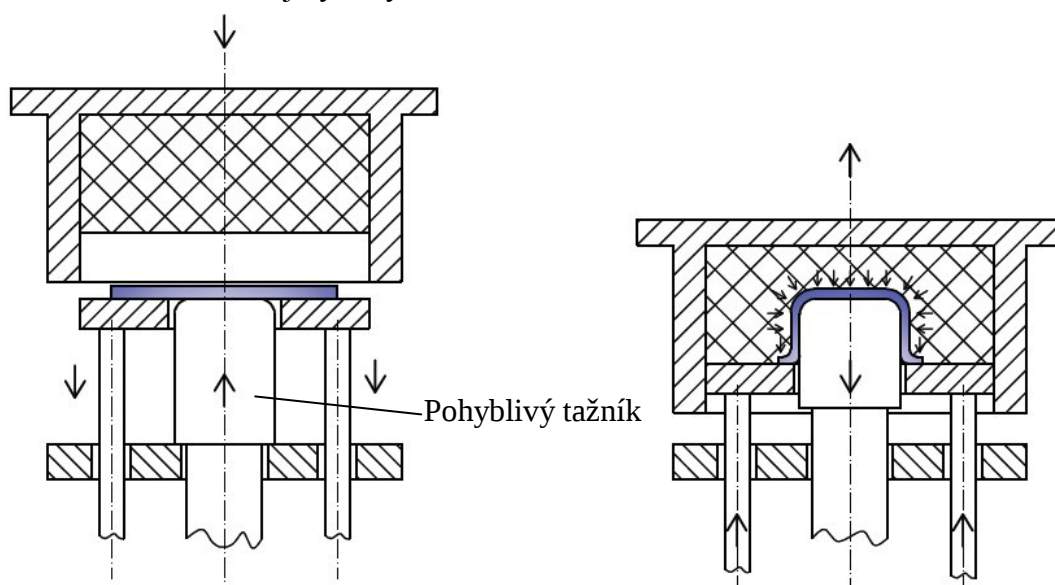
Obr. 3.3 Metoda Marform [14], [19]

3.3 Metoda Hidraw [14], [19], [26]

Tato metoda (obr 3.4) je kombinací metod Marform a Hydroform. Vyznačuje se pohyblivým tažníkem, tažnicí a přidržovačem.

Přístřih materiálu se vloží na přidržovač, který je v rovině s čelem tažníku. Pohybem beranu lisu dosedne pryžový blok na materiál a začne stlačovat desku přidržovače, přičemž se současně zvedá i tažník, který tak vniká do pryžového bloku a postupně táhne výtažek.

Metoda neposkytuje výrazné výhody a vlivem faktu pohyblivosti všech součástí jsou tažidla dražší než u jiných systémů. V důsledku toho není metoda moc rozšířená.



Obr. 3.4 Metoda Hidraw [14], [19]

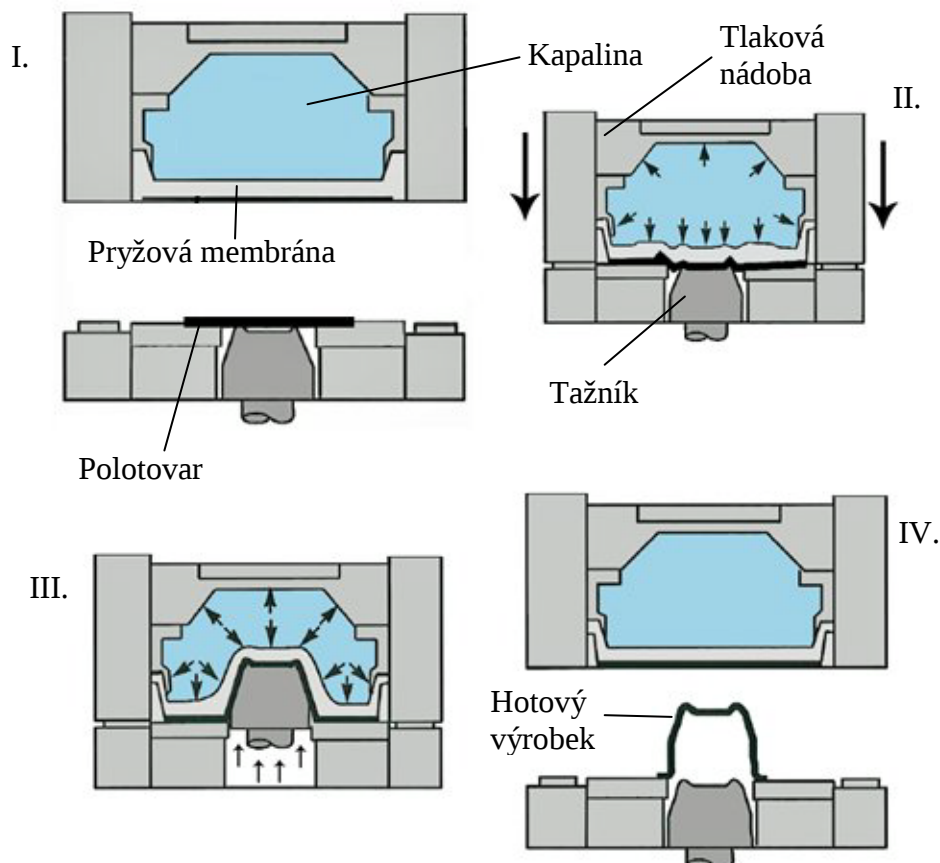
3.4 Metoda Hydroform [14], [16], [19], [26]

Tažnice je nahrazena kapalinou uzavřenou v tlakové nádobě pryžovou membránou. Pevný tažník je zatlačován proti membráně, čímž vyvolává protitlak kapaliny (přibližně 60 MPa, ovšem někdy stoupá až na 100 MPa). Velikost protitlaku je regulována přepouštěcím ventilem. Kapalina tvaruje polotovar proti tažníku a současně slouží jako přidržovač.

Metoda (obr. 3.5) se využívá pro tažení hlubokých a složitých výtažků. Životnost membrány se pohybuje mezi (5000 až 10000) ks. Metoda dosahuje vyšších redukcí než metoda Marform a proti klasickému způsobu tažení má výhody v úspoře tažných operací. Dosahuje se značné úspory na pořizovacích nákladech za tažidla, která je až 95% oproti klasickým tažidlům. Tažníky je možno vyrábět z lehkých slitin, dřeva i plastů.

Tlak, který působí na membránu, je na počátku tažení nejnižší a s hloubkou výtažku se zvyšuje. S velikostí tlaku se mění i pomyslný tažný poloměr tažnice, který je při nejnižším tlaku na počátku tažení největší. Tím se v tomto kritickém okamžiku tažení usnadní plastická deformace kovu. V porovnání s klasickými ocelovými tažnicemi, kde je poloměr neměnný, je to velká výhoda. Malý tažný poloměr má za následek trhání taženého materiálu a naopak velký poloměr způsobuje zvlnění materiálu. Kontrolu tlaku u metody Hydroform lze dosáhnout plynulé změny tažného

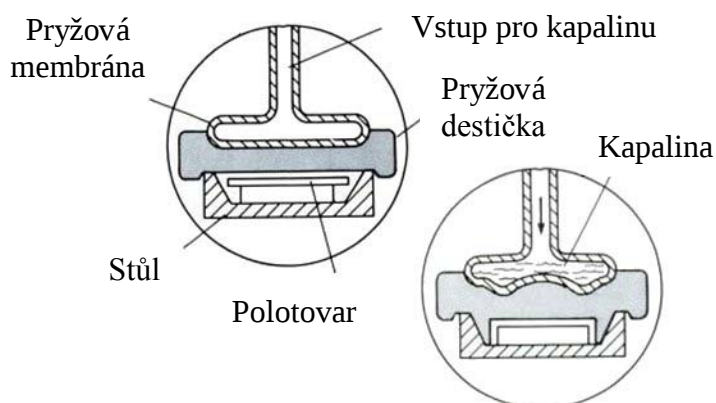
poloměru, a tak se přizpůsobit měnícím podmínkám v průběhu tažení. Výtažky mají téměř rovnoměrnou tloušťku materiálu. Ideální pro složité a nepravidelné tvary. Nevýhodou je poměrně vysoká pořizovací cena lisu.



Obr. 3.5 Schéma metody Hydroform [16]

3.5 Metoda Verson-Wheelon [14], [15], [18]

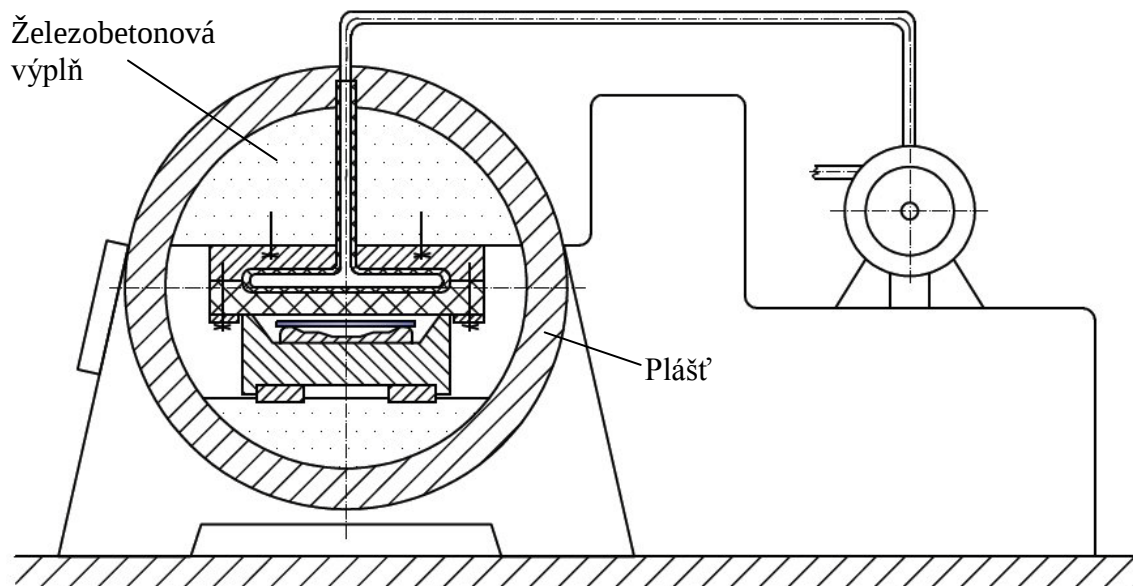
Při lisování dochází k zvětšování pryžového vaku vlivem tlaku kapaliny dodávané vysokotlakým čerpadlem. To má za následek přenos tlaku na pryžovou membránu a konečně pak na polotovár, čímž dochází k jeho tváření (obr. 3.6).



Obr. 3.6 Schéma průběhu tváření [18]

Uvnitř kovaného silnostěnného válcového pláště jsou umístěny dva výsuvné vzájemně spojené stoly. Uspořádání stolů umožňuje za současného lisování na prvním stole přípravu polotovarů na druhém stole, který je mimo pracovní prostor lisu. Ovládání stolů je zajištěno hydraulickými válci. V prostoru lisu (obr. 3.7) nad

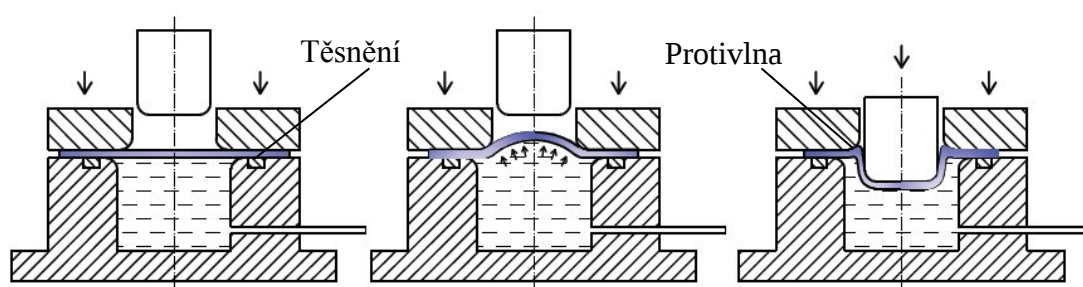
pryžovým vakem a pod stolem je železobetonová výplň. Čerpací stanice kapaliny je koncipována pod základy lisu a skládá se ze soustavy nízkotlakého odstředivého a vysokotlakého pístového čerpadla. Metoda se využívá zejména k výrobě výlisků pro letecký průmysl.



Obr. 3.7 Schéma lisu Verson – Wheelon [15]

3.6 Hydromechanické tažení [2], [13], [10], [37]

Při HMT působí tlaková kapalina na výtažek přímo (není oddělena pryžovým vakem). Principem je (obr 3.8), že rovinný přístřih plechu je uchycen mezi přidržovačem a tažnicí, avšak pohybovat se může. Tažník tváří plech do tažné komory, kde je kapalina. Kapalina působí hydrostatickým tlakem na plech, který se tlačí na celou plochu tažníku. Tlak je řízen speciálním ventilem. Proti úniku kapaliny se používá kvalitní těsnění.



Obr. 3.8 Schéma principu metody HMT [2]

Výhody:

- podstatně příznivější součinitel tažení a tím možnost snížení počtu tažných a mezižhacích operací,
- možnost použití tažné komory pro různé tvary výlisků, stačí pouze vyměnit tažník požadovaného tvaru,
- příznivější třecí podmínky při tažení, neboť dochází k tažení přes tažnou hranu vytvořenou tlakovou kapalinou,

- podepření přístřihu při tažení v celé ploše tlakovou kapalinou,
- kvalitnější povrch výtažků bez nutnosti dokončovacích operací,
- rovnoměrnější tloušťka stěny výtažku s minimálním ztenčením v ohybu u dna,
- dosažení větší rozměrové přesnosti výtažků bez nutnosti kalibrace.

Nevýhody:

- nutnost citlivé regulace tlaku (zvláště při tažení tenkých plechů do $t = 1 \text{ mm}$),
- jen výtažky s přírubou,
- vysoký přidržovací tlak (kvůli těsnění),
- nižší produktivita.

3.7 Plošné superplastické tváření [6], [19], [36]

Předpokladem pro superplastické tváření je velmi jemné rovnoosé zrno tvářeného materiálu, které zůstává stabilní v průběhu deformace. Velikost zrna musí být velmi malá, řádově mikrometry. Teplota deformace musí být vysoká ($T > 0,4T_{TAV}$). Naopak rychlost deformace musí být nízká (10^{-2} až 10^{-4}) s^{-1} .

Charakteristika tvářecího procesu:

- tvarově složité dílce velkých rozměrů, zejména letecký a kosmický průmysl,
- deformace tlakem plynu (1 až 20) bar,
- tvářený plech je pevně upnut na okrajích, nedochází k jeho posuvu, ale ke ztenčování, které je však nerovnoměrné,
- především se tváří titanové a hliníkové slitiny (např. Ti - 6Al - 4V),
- děje probíhají za konstantní teploty a rychlosti.

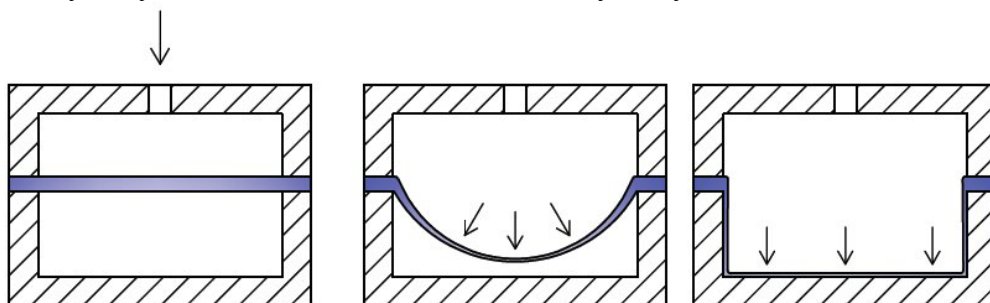
Nástroj:

Konkávní nástroj: nástrojem je matrice s dutinou, která odpovídá negativu zhotoveného výrobku.

Konvexní nástroj: nástroj má podobu lisovnicku s požadovaným tvarem.

Superplastické tváření (SPF) s konkávním nástrojem

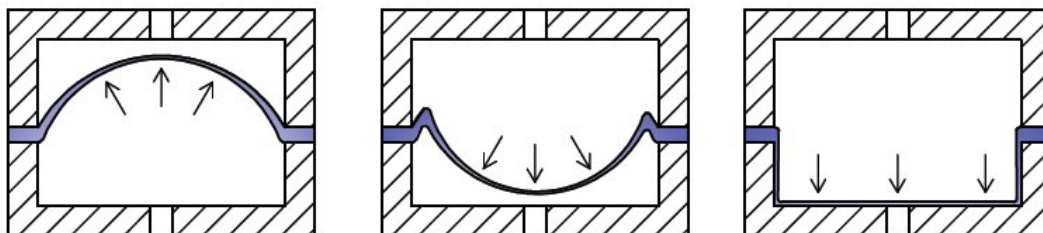
Sevřený polotovár na okrajích v zápustce je vydat tlakem plynu (obr. 3.9). Limitní deformace je dána poloměry zaoblení a poměrem šířky ke hloubce zápustky. Používá se u mělkých výtažků. Dochází k zeslabení tloušťky stěny.



Obr. 3.9 Schéma SPF s konkávním nástrojem [19].

Reverzní SPF s konkávním nástrojem

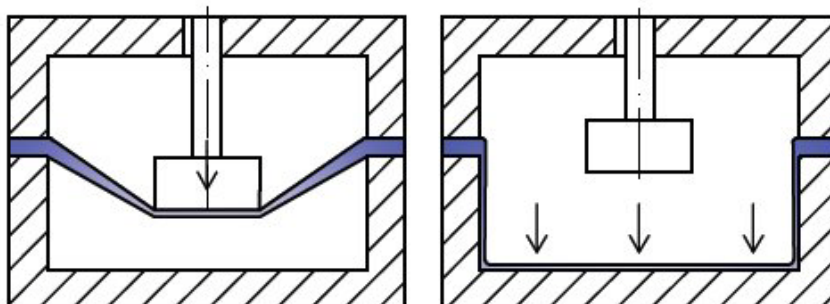
Polotovár (obr. 3.10) je v první operaci vypínán inertním médiem ze zápustky do prostoru vyplněného inertním plynem (tím je zvětšována jeho plocha a zmenšována tloušťka stěny), ve druhé operaci je tlakem média na druhou stranu povrchu polotovaru tvarován do zápustky. Dosahuje se rovnoměrnější tloušťky stěny výrobku než u předchozí metody. Výška vyboulení je limitována vznikem přeložek v následující operaci a neměla by přesáhnout 1,1 násobek hloubky zápustky.



Obr. 3.10 Schéma reverzní SPF s konkávním nástrojem [19]

SPF s konkávním nástrojem a využití tažníku

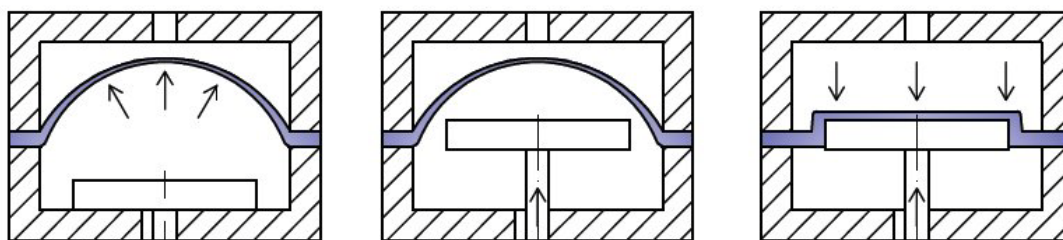
Deformace se soustředí do plochy materiálu mezi zápustkou a tažníkem (obr. 3.11), po styku materiálu a dna tažnice je materiál dotvarován tlakem inertního média. Výsledkem je výtažek se stěnou silnější na dně a slabší ve stěně.



Obr. 3.11 Schéma SPF s konkávním nástrojem a využití tažníku [19]

SPF s konvexním nástrojem

Kontakt plechu s lisovником nastává v pozdější fázi procesu, výsledkem je rovnoměrnější tloušťka stěny (obr.3.12).



Obr. 3.12 Schéma SPF s konvexním nástrojem [19]

Další možností je SPF s vakuovým tvářením. Jedná se o systém podtlaků.

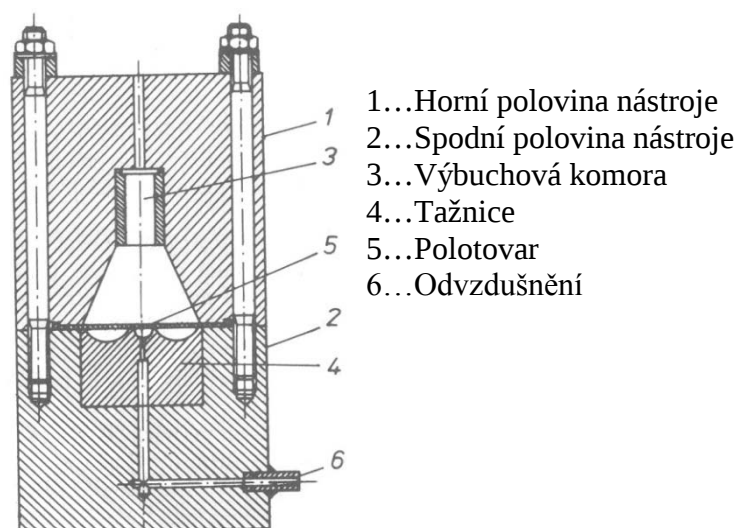
3.8 Explosivní tažení kovů [10], [14]

Metoda tváření kovů výbuchem využívá nárazové vlny a tlaku plynů vzniklých výbuchem. Vhodnou volbou množství a druhu výbušniny lze tlak plynů i stupeň deformace kontrolovat tak, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku. Při tváření výbuchem v otevřeném nástroji se dosahuje velmi malých tvářecích časů (0,001 až 0,002) s.

Ke tváření jsou vhodné všechny běžné druhy ocelí včetně ocelí korozivzdorné, titan a jeho slitiny, hořčík a většina hliníkových slitin. Ve srovnání s běžnými výrobními způsoby je zde velká úspora výrobních nákladů a to zejména pro tváření velkých součástí.

Největší problém je odčerpání vzduchu mezi tvářeným plechem a tažnicí. Vzduch zde působí jako tlumič zabraňující dosednutí plechu na povrch tažnice.

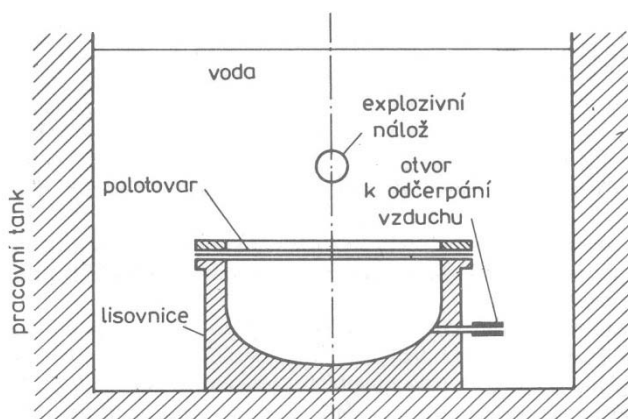
Tváření v uzavřeném prostoru nástroje



Obr. 3.13 Schéma uzavřeného nástroje [14]

Využívá se tlaku vzniklého spálením hořlavé směsi (např.: střelný prach). Dávkováním směsi je možno řídit průběh tlaku i jeho maximální velikost. Lze tak dosahovat značných rychlostí deformace. Nevýhodou je, že v případě tváření velkých výtažků by nástroj (obr.3.13) musel být příliš mohutný (odolnost proti vysokým tlakům).

Tváření v otevřeném nástroji



Obr. 3.14 Schéma otevřeného nástroje [14]

Nálož je odpalována ve vodě. V případě, kdy by byla nálož umístěna na přístřihu, došlo by při odpálení buď k jeho porušení, nebo pouze k lokální deformaci. Proto je nálož umísťována v určité vzdálenosti od přístřihu. Při porovnání se systémem v uzavřeném nástroji, kde není rychlost hoření větší než 300 m/s a pracovní tlaky nepřevyšují 800 MPa (omezeno pevností tažidla), je při tváření v otevřeném nástroji (obr. 3.14) za použití brizantních trhavin

využito tlakové vlny, která se pohybuje rychlostí (1 000 až 9 000) m/s a je schopna vyvodit tlaky až do 14 000 MPa.

Zhodnocení tváření výbuchem

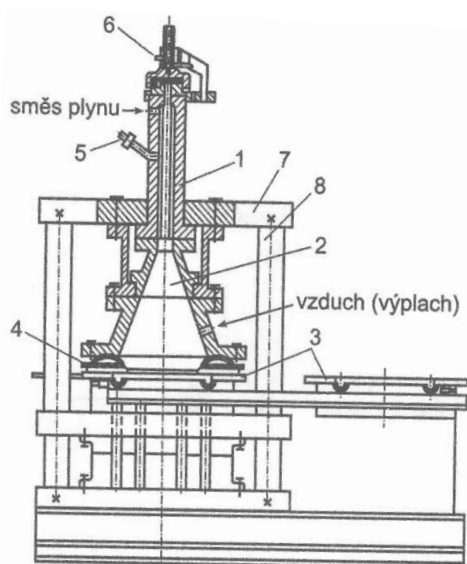
Výhody:

- dílce složitějších a rozměrných tvarů,
- nízká cena nástrojů i výrobních prostorů,
- snížení počtu operací a mezioperačního žhání,
- polotovary mohou být svařeny.

Nevýhody:

- malá produktivita výroby,
- hluk,
- nebezpečný provoz, různá bezpečnostní opatření, speciální školení pracovníků apod.

3.9 Využití výbuchu plynu [10]



- 1...detonační trubka
- 2...spalovací komora
- 3...stůl
- 4...duté pryžové těsnění
- 5...tvorba el. jiskry
- 6...měřič plnicího tlaku
- 7,8...příčnický

Obr. 3.15 Schéma tváření s využitím výbuchu plynu [10]

Tlak působící na polotovar je vyvozen detonační vlnou, která vzniká v důsledku výbuchu plynu. Rychlost šíření detonační vlny se pohybuje v rozsahu (20 až 200) m/s a délka trvání procesu je (0,4 až 2,0) μ s. Mezi materiály zpracovávané tímto způsobem patří Al slitiny a vysokopevnostní oceli, při tloušťce plechu (0,1 až 3) mm. Využívá se zejména pro mělké tažení, ohýbání, lemování a kalibrování. Zařízení ve formě lisu využívající tento typ tváření je uvedeno na (obr. 3.15) U zařízení může být použita i pryžová membrána, která plní funkci ochrany výlisku proti splodinám hoření. Pomocí tloušťky této membrány lze měnit účinky tlaku.

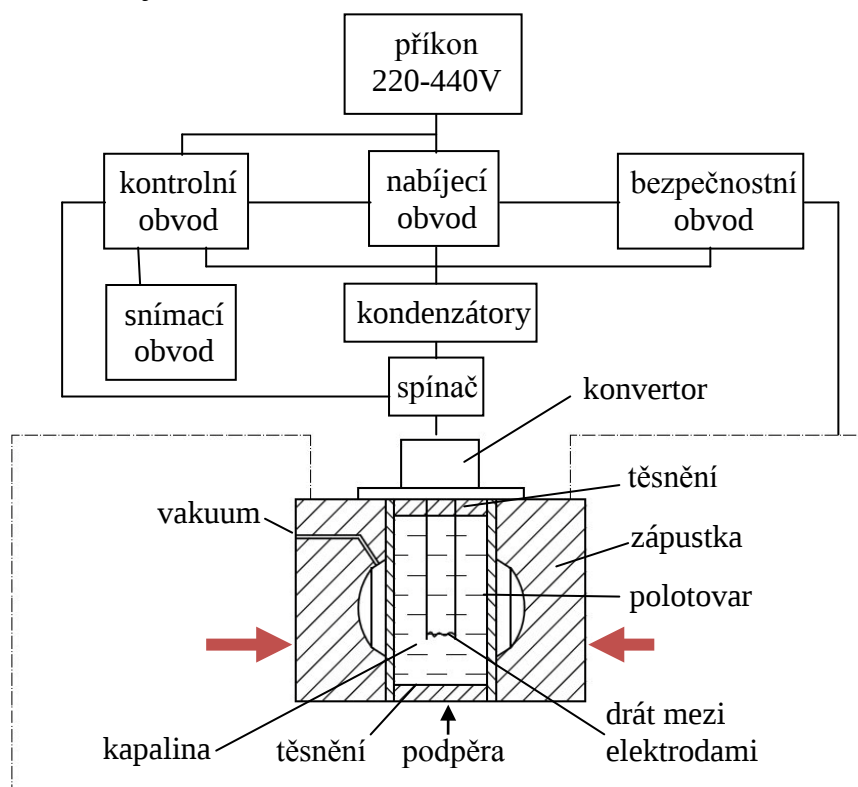
Výhody:

- nízká cena plynu,
- možnost přesného dávkování směsi (tím pádem pracovního tlaku),
- jednoduchost zařízení,
- vysoká přesnost rozměrů dílců.

3.10 Elektrohydraulické impulsní tváření [10]

Principem je tváření elektrickým výbojem o vysokém napětí v kapalině. Dochází ke vzniku tlakové vlny, jejíž energie je schopna tvářet kovové výtažky. Pokud tlaková vlna nebyla dostatečná, lze cyklus snadno a rychle opakovat, což je výhoda oproti tváření výbuchem.

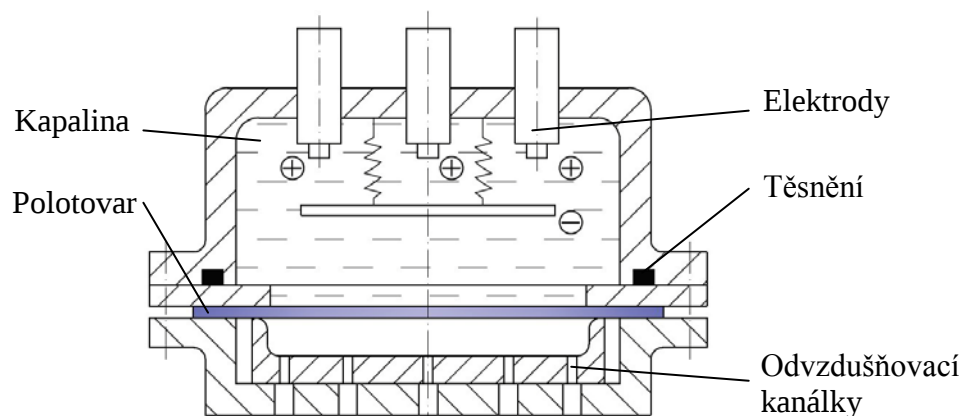
Metoda se i mimo jiné využívá při radiálním vypínání. Schéma je uvedeno na obr. 3.16. Pro tažení (obr. 3.17) je schéma obdobné, rozdíl je v konstrukčním uspořádání nástroje.



Obr. 3.16 Schéma elektrohydraulického impulsního tváření [10]

Činitelé procesu:

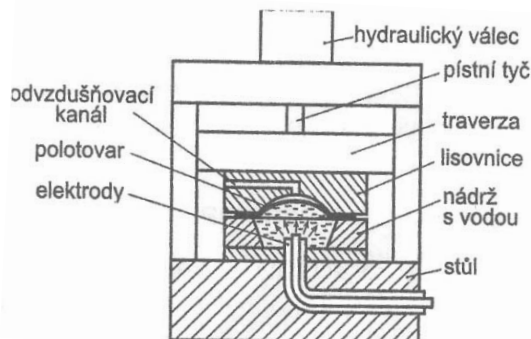
Napětí a kapacita kondenzátorů, druh výboje, vzdálenost elektrod, uspořádání elektrod.



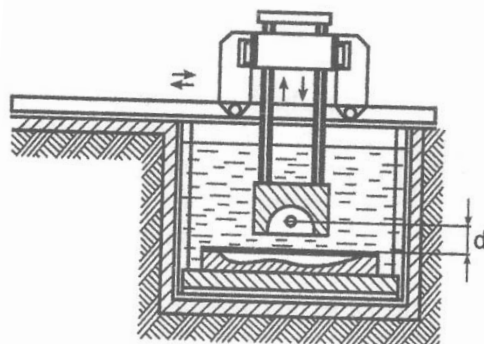
Obr. 3.17 Přípravek pro tažení [10]

Tváření v otevřeném nástroji

Použití zejména pro tváření rozměrných dílců. Jestliže je tažnice ponořená, můžeme aplikovat elektrody do tzv. zvonu (obr. 3.18). Zvon je umístěn v předepsané vzdálenosti d od čela polotovaru.



Obr. 3.19 Schéma tváření v uzavřeném nástroji [10]



Obr. 3.18 Schéma tváření v otevřeném nástroji [10]

Tváření v uzavřeném prostoru nástroje

Uzavřené systémy se využívají ve formě přípravků (např. radiální vypínání trubek) nebo za použití speciálních lisů (obr. 3.19).

Porovnání s výbuchovým tvářením

Výhody:

- snadná opakovatelnost procesu a změna velikosti elektrického výboje,
- vyšší efektivnost využití energie,
- možnost směřování dráhy elektrického výboje.

Nevýhody:

- složitost zařízení,
- tvarování rozměrných dílů s větší tloušťkou stěny je obtížnější.

3.11 Magnetickoimplusní tváření [10]

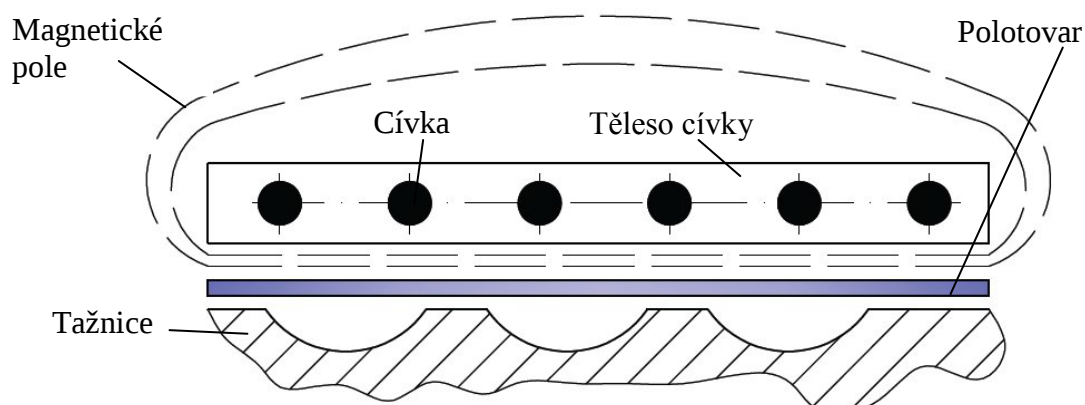
Schéma elektrického obvodu je téměř stejné jako u elektrohydraulického impulsního tváření.

Vlivem impulsního vybití kondenzátoru se kolem cívky (obr. 3.20) indukuje magnetické pole, které ve vodivém dílcu vyvolá vířivé proudy. Tyto proudy vytlačují magnetické pole z prostoru mezi dílcem a cívkou. Důsledkem je vznik velkého tlaku na dílec, který je velkou rychlostí přitlačen na nástroj.

Jako výchozí polotovaz může být použit plochý přístřih, trubka atd. Metoda je vhodná pro tváření prolisů, lemů, vystřihování dílců, kalibrování výlisků atp.

Činitelé procesu

Indukce, hloubka průniku magnetického pole, čas impulsu, materiál polotovaru, mezera mezi činnými prvky.



Obr. 3.20 Schéma magneticko-impulsního tváření [10]

Výhody:

- možnost koncentrace tlaku,
- rovnoměrné rozložení tlaku po celém povrchu dílce,
- malá hlučnost provozu,
- jednoduchost nástroje.

Nevýhody:

- větší poruchovost,
- dostupnost zařízení,
- energetická spotřeba,
- tváření dílců víceméně menších rozměrů.

3.12 Shrnutí

Tváření vysokou rychlostí deformace je především vhodné pro dílce velkých rozměrů a složitých tvarů. Tento typ tváření je tedy pro daný případ, kdy jde o prototypovou výrobu kuželových prolisů v plechu malých rozměrů, složitý.

Co se týče superplastického tváření (tváření tlakem plynu) je zřejmé, že metoda je taktéž příliš složitá pro zadanou součást, nemluvě o vhodnosti zpracovávaného plechu spíše z titanových a hliníkových slitin a požadavek vysoké teploty tváření.

Zbývající nabízené možnosti výroby jsou víceméně všechny vhodné. Svoji roli zde ovšem hraje náročnost lisu a tudíž jeho cena. Je rozdíl jestli se použije lis pro tváření elastomerem či kapalinou. Nejjednodušší a nejméně náročná metoda na provedení a na požadavky lisu je metoda Guerin, která proto bude zvolena pro uskutečnění experimentu.

4 TAŽENÍ NEPEVNÝM NÁSTROJEM [3], [8], [10], [15], [22]

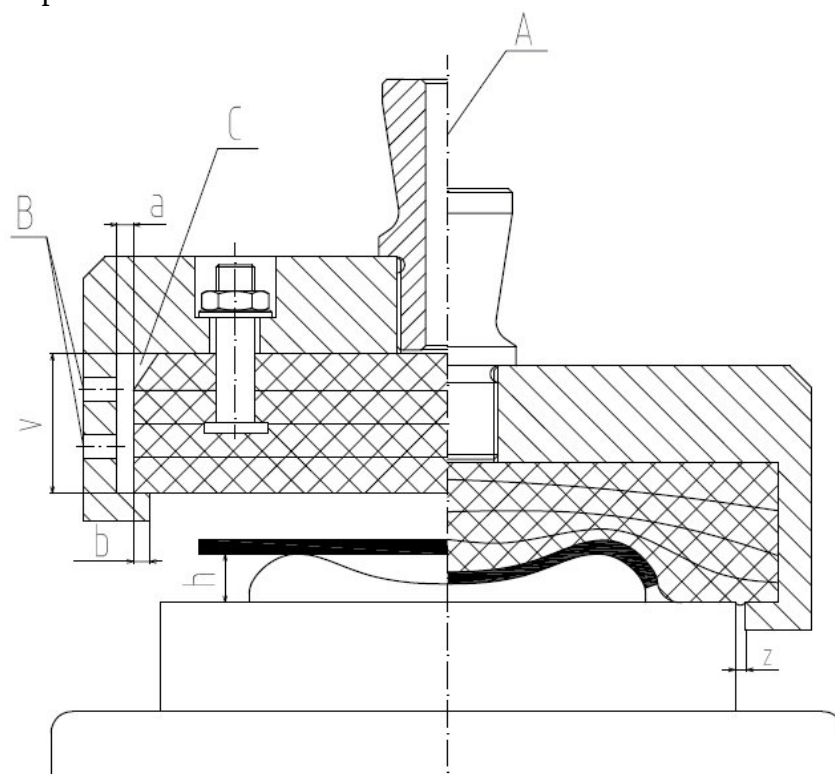
Následující kapitola je věnována detailnímu rozboru metody Guerin a podstatným tématům, která jsou potřebná pro řešení experimentální části práce.

4.1 Tažení pomocí metody Guerin [15]

Tažnice je tvořena elastickým blokem upevněným v rámu. Tažník je připevněn na ponorné desce, která je spojena se základní deskou.

Při pracovním zdvihu beranu elastický blok nejprve dosedne na přístřih. S dalším pokračováním zdvihu se vnitřní prostor nástroje zmenšuje a dochází ke stlačování bloku. V důsledku elastických vlastností začne blok tlačit na přístřih, který se nakonec obepne kolem tažníku. Po dokončení tažení se tažnice vrátí do výchozí polohy a tvar elastického bloku nabude výchozího stavu (obr. 4.1).

Tento způsob je především vhodný pro mělké tažení, sdružené mělké tažení a pro některé druhy stříhání a ohýbání. Pro hlubší tažení vyžadující přidržovač není tato metoda vhodná, avšak hluboké tažení možné je. Tažení však musí být rozděleno do více tažných operací.



Obr. 4.1 Schéma metody Guerin [15]

Rozměr elastomerového bloku

Elastický blok se může skládat z jednoho či více bloků. Vícevrstvý blok má tu výhodu, že při opotřebení bloku, který je ve styku s tvářeným plechem, umožňuje výměnu za blok z vyšších vrstev.

Mezi blokem a stěnami rámu bývá volena vůle $a = 5 \text{ mm}$. To má zajistit snížení velikosti tření mezi blokem a stěnami rámu. Elastické bloky jsou v rámu připevněny

ocelovými lanky, šrouby, ale také bývají zalisovány. Přesah pryže je v tom případě volen (0,5 až 1,5) mm.

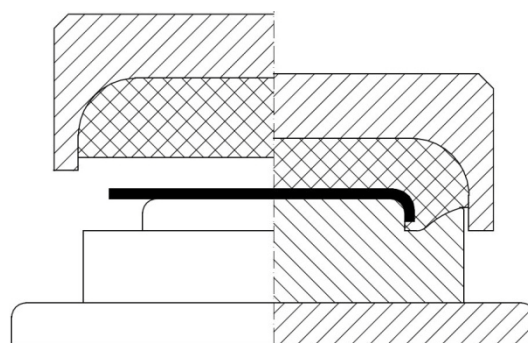
Příčný rozměr elastického bloku vzhledem k přístřihu je volen větší minimálně o 20 mm a tloušťka má být přizpůsobena výšce výtažku. U větších tloušťek bloku je jeho opotřebení větší a jsou zapotřebí vyšší tvářecí síly pro tažení. Velká část vynaložené práce totiž připadá na stlačení tažného bloku. Podíl vynaložené práce na vlastní tažení je poměrně malý.

Rám (kontejner)

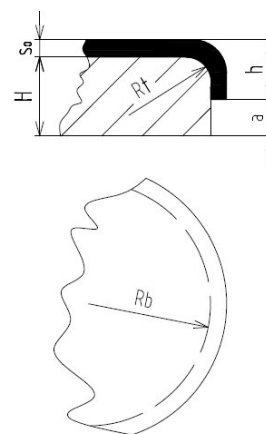
Tvar rámu je v průřezu, rovnoběžném se základnou, většinou pravoúhlý nebo kruhový. Vyrábí se svařováním, skládáním z desek nebo odlitím. Rám je upnut buď na beranu a sjíždí k tažníku, nebo je upevněn na horním nehybném příčniku lisu a tažník je zvedán spodním hydraulickým válcem lisu do rámu.

Vůle z mezi ponornou deskou a rámem je většinou volena $z \leq (0,75 \text{ až } 0,775) \text{ mm}$. Hloubka rámu by měla být elastickým blokem vyplněna ze dvou třetin, zejména kvůli dobrému zavedení ponorné desky. Rám nebo stopka je opatřena otvorem A, který slouží jako přívod stlačeného vzduchu pro vytlačení elastického bloku při jeho výměně. Než se začne s lisováním, je potřeba otvor zazátkovat, aby se blok do otvoru nevtačoval. Rám je též opatřen otvory na stěnách B, které slouží pro manipulaci s příložkami C. Tyto příložky je možno použít pro vyjmutí elastického bloku z rámu při demontáži.

Kromě klasických pravoúhlých dutin rámu je možné využít dutiny tvarové. Podoba tvarové dutiny má spojitost s tvarem výtažku. Takto upravený rám lépe využívá elastického bloku k tažení výtažku. Zmenší se potřebná síla a práce. Nápodobně tak může být tvarována ponorná deska v okolí tažníku. Taková úprava pak podporuje orientovaný pohyb elastomeru k obrysu tažníku. Náčrtek možné podoby je vidět na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Tvarovaný rám s ponornou deskou [15]



Obr. 4.3 Rozměry tažníku [15]

Tažník

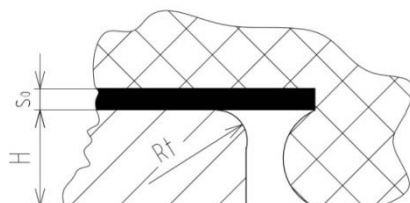
Vnější rozměry tažníku (obr. 4.3) odpovídají vnitřním rozměrům výtažku. Pro úspěšné zhotovení výtažku je potřeba dodržet podmínku, aby výška tažníku H byla vyšší o hodnotu a , oproti výšce h lemu. Minimální výška a musí mít takovou hodnotu, aby se elastický blok dostatečně stlačil a celou šířku lemu přitlačoval na tažník. Při příliš vysoké hodnotě výšky a stlačený blok obteče přístřih tak, že se část bloku vtlačí pod lem, a tak je zabráněno celkovému dotlačení plechu na tažník, což je nepřípustné.

Tab. 4.1 Doporučené hodnoty [15]

R_b [mm]	≤ 200	> 200
a [mm]	15	10

Doporučená hodnota výšky a v závislosti na poloměru křivosti stěny R_b je znázorněna v tab. 4.1

Čím větší je tvrdost elastického bloku, tím větší výšku h lemu lze při jinak stejných podmínkách (tloušťka plechu s_0 , zaoblení tažné hrany R_t , atd.) dosáhnout (obr. 4.4). Naproti tomu měkký elastický blok lem obtéká a netváří (obr. 4.5)

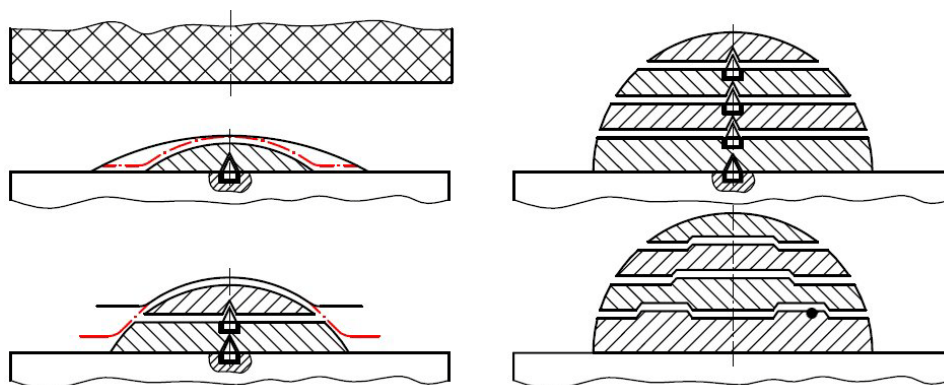


Obr. 4.5 Měkký elastický blok [15]



Obr. 4.4 Tvrdý elastický blok [15]

Hluboké tažení metodou Guerin je možné v případě rozložení tažení na více operací a zároveň s využitím skládaného tažníku. Jednotlivé části tažníku jsou středěny pomocí kolíků nebo osazením (obr. 4.6).



Obr. 4.6 Příklad skládaného tažníku [15]

Materiál tažníku se volí podle obtížnosti tváření, požadované přesnosti výtažku a velikosti série. Při malých výrobních sériích a mělkých výtažcích je možné upřednostnit umělé pryskyřice před kalenou nástrojovou ocelí. Výrobní cena tažníku se tak zlevní o (30 až 70%).

Dále pak je možné využít i vrstvené bukové dřevo nebo dřeva tvrzená. Funkční hrany mohou být vyztuženy ocelovými vložkami. Tažníky mohou být také z obvyklých nízkouhlíkových konstrukčních ocelí nebo ze šedé litiny.

4.2 Tažení pomocí elastického bloku [12], [14], [15]

Mezi výtažky takto tažené se řadí součásti s jehlanovitými, kuželovitými a kulovými tvary, součásti složité s menší hloubkou, součásti se skloněnou přírubou či dnem.

Vyrábí se výlisky, které jsou z pohledu klasického tažení obtížně zhotovitelné, dále pak není potřeba nákladný nástroj (tažnice) z hlediska přesnosti obrábění, protože funkci přebírá elastický blok.

Snižuje se potřebný počet tažných operací. Pomocí jedné tažné operace je možno vyrobit výtažky, které u jiných způsobů hlubokého tažení vyžadují dvou a více operací.

Dosahuje se vyšší rozměrové přesnosti výtažků. Není potřeba zařazení kalibrace. Přítlačným tlakem se zabraňuje zborcení vypouklých ploch výtažků. Přesnost vnitřních rozměrů výtažku taženého elastickým blokem se shoduje s přesností vnějších rozměrů tažníku.

Velmi vysoká kvalita povrchu výtažku. Součinitel tření, potažmo třecí napětí mezi elastickým blokem (tažnicí) a přístřihem je menší v porovnání s klasickou pevnou tažnicí. Díky tomu je minimalizováno riziko poškození povrchu výtažku poškrábáním.

Je zajištěno menší ztenčení tloušťky stěny výtažku, oproti způsobu s pevnou tažnicí. Díky tomu je možno použít výchozí plechy o menší tloušťce, čímž se dosáhne ušetření nákladů za materiál a snížení hmotnosti výtažku.

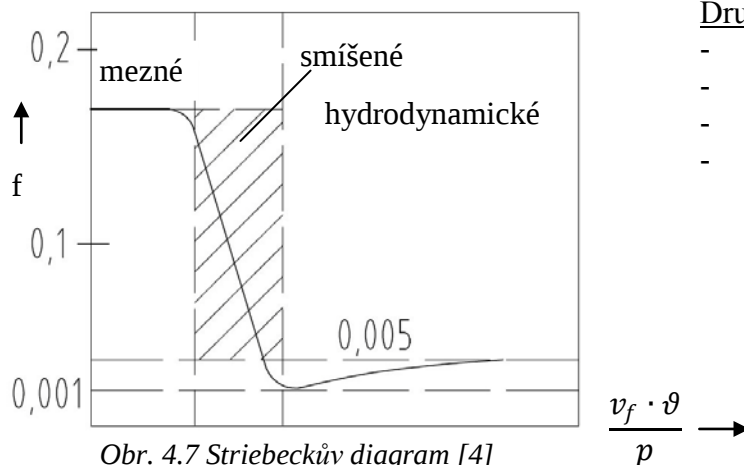
Výtažky je možno táhnout vyšším stupněm tažení K (o 15% až 20%), oproti tažení pevným nástrojem.

4.3 Tření a mazání [4], [14], [22], [26]

Tření má vliv na tvářecí proces především takový, že s jeho zvyšováním se zvyšuje i množství energie nutné k přetvoření materiálu. Úspory energie s vhodným mazivem a úpravou nástrojů činí až 11% celkových nákladů na energii nutnou pro zpracování výlisků a provoz strojních součástí. Vnější tření je charakteristickou veličinou při popisu procesu mezi tvářeným materiálem a nástrojem. Sekundární síly od vnějších tření jsou aktivní a pasivní.

- pasivní tření, které brzdí plastickou deformaci a zvyšuje potřebnou energii k přetvoření vzorku,
- aktivní tření, které umožňuje uskutečnění technologie vhodným tokem materiálu.

Problémy se snížením tření a opotřebení s aplikací maziv se zabývá TRIBOLOGIE, která v sobě kombinuje obory jako je kinematika, hydromechanika, termomechanika, materiálové inženýrství a chemie.



Obr. 4.7 Striebeckův diagram [4]

Druhy tření (obr. 4.7):

- suché,
- mezne,
- hydrodynamické,
- smíšené.

Veličiny ovlivňující tření:

- a) veličiny podmíněné tvářecím postupem
- b) veličiny podmíněné materiálem
- c) veličiny podmíněné druhem maziva

Součinitel tření za studena f

- podle mazadla, druhu a jakosti třecích ploch je $f = 0,04$ až $0,2$ (při objemovém tváření $f = 0,04$ až $0,08$, při tažení je $f = 0,04$ až $0,2$),
- z technologických podmínek mají rozhodující vliv na součinitel tření teplota, rychlost deformace a měrný tlak.

Maziva pro tažení

Máže se především proto, aby se zabránilo kovovému styku mezi nástrojem a polotovarem a aby se dosáhlo snížení třecích ztrát, tedy i snížení přetvárných sil a energií potřebných pro danou tvářecí operaci.

Nemáže se většinou celý přístřih, protože ze strany tažníku je výhodné mít tření co nejvyšší a ze strany tažnice je jej potřeba co nejvíce snížit. Mazadla, která se používají, nesmí poškozovat povrch nástroje a polotovaru, musí lehce přilnout a vytvořit rovnoměrný film.

Kritéria pro výběr maziva:

- spojení mazacího a chladicího účinku,
- obtížnost tváření,
- vhodnost maziva pro další zpracování (např. svařování),
- jednoduchost nanášení a odstranění maziva atd.

Tab. 4.2 Příklad olejů pro tažení a ražení [23]

Označení	Viskozita ν při 40°C [mm^2s^{-1}]	Teplota vzplanutí T_{VZ} [$^\circ\text{C}$]	Hustota ρ při 20°C [g/cm^3]
HFF 18 CF	50	220	0,91
HFF 20 CF	80	220	0,91
HFF 22 CF	245	220	0,91

Mazivo uvedené v tab. 4.2 je vhodné pro použití u hlubokého tažení a jemného ražení. Také je vhodné pro tažení profilů, trubek a drátu z nerez a vysokolegovaných ocelí.

4.4 Úvod do membránové teorie [8], [10]

Pomocí membránové teorie je možné vypočítat změny tloušťky stěny výlisku, potřebný měrný tlak (např. kapaliny) při tváření atd.

K usnadnění rozboru tažení tenkostěnných polotovarů se využívá zjednodušeného membránového modelu, předpokládají se vlastnosti:

- schopnost přenášet meridiální a obvodové napětí,
- ideální ohybnost,
- ideálně plastický, izotropní materiál,
- tloušťka materiálu je konstantní ($s=\text{konst.}$) a mez kluzu je konstantní ($\sigma_K=\text{konst.}$) v každém bodu materiálu, také lze použít stálou hodnotu jejich součinů ($\sigma_K \cdot s=\text{konst.}$),
- model není schopen přenášet ohybové momenty
- osově symetrický model.

V membránové teorii se pro řešení napjatosti využívají tři základní rovnice, a to:

Diferenciální rce rovnováhy v radiálním směru pro rovinnou napjatost v polárních souřadnicích:

$$\frac{d\sigma_m}{dr} + \frac{\sigma_m - \sigma_\varphi}{r} = 0 \quad (4.1)$$

..kde: σ_m ...meridiální napětí σ_2 , σ_φ ...obvodové napětí σ_1

Laplaceova rce rovnováhy ve směru normály elementu:

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{s} \quad (4.2)$$

..kde: $R_{1,2}$...poloměry zakřivení výlisku, p ...tlak nepevného nástroje, s ...tloušťka stěny

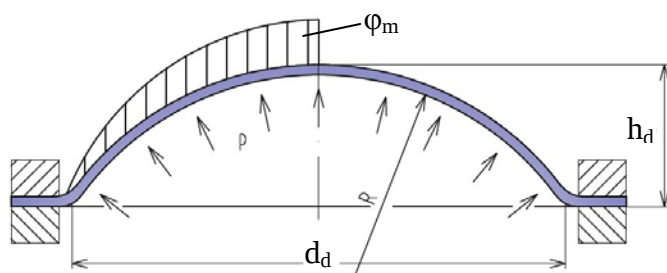
Podmínka plasticity HMM pro rovinou napjatost ($\sigma_3=0$):

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_K^2 \quad (4.3)$$

4.5 Analýza vydutí prolisu [3], [8], [10]

Jestliže jsou při tažení okraje výchozího polotovaru pevně uchyceny v tažidle nebo

když tažná dutina je v dostatečně velké vzdálenosti od okraje polotovaru, potom je charakteristickým jevem fakt, že k vytvoření prolisu (obr. 4.8) dochází jen vlivem ztenčování stěny polotovaru. Nejde tedy o přesun materiálu z ploché příruby obklopující tažnou dutinu. Zpravidla největší zatížení prolisu je



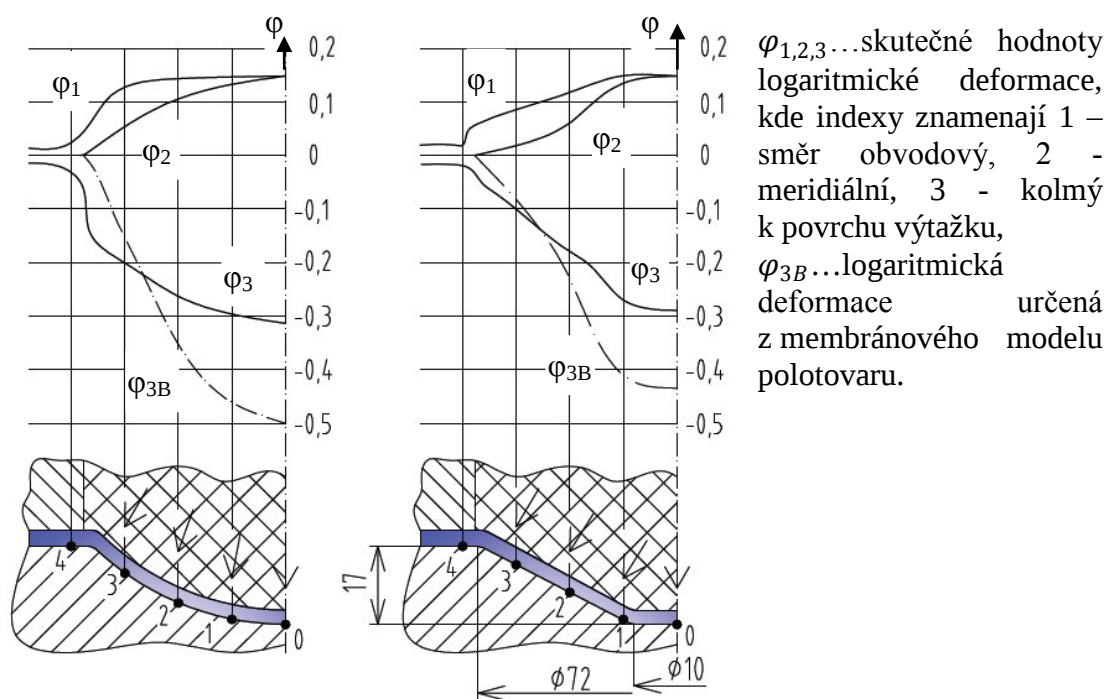
Obr. 4.8 Deformace prolisu kapalinou nebo pryží (bez uvažování tření) [3]

v jeho vrcholu, kde při dosažení kritické hodnoty napětí dochází k jeho porušení.

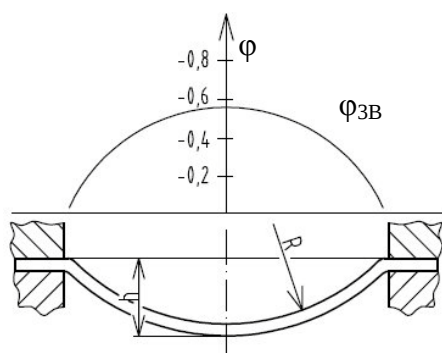
Tváření plechu tlakem kapaliny nebo pryže probíhá v podmínkách téměř stejných podmínkách v membránové teorii. Je to zejména proto, že tuhost ohýbaného plechu nemá často velký význam a tlak pryže/polyuretanu nebo kapaliny je kolmý k povrchu polotovaru.

Mezi skutečným a teoretickým průběhem procesu vznikají odchylky způsobené mimo jiné zpevňováním materiálu, probíhající jiným způsobem, než bylo předpokládáno v membránové teorii. Většina materiálů plechů používaných k tažení se v první fázi tváření vyznačují tak velkým zvýšením meze kluzu σ_K , že se tím včetně kompenzace úbytku tloušťky plechu také vyvolá zvětšení součinu $\sigma_K \cdot s$. Následně v další fázi deformace (dosažení extrémní hodnoty) začíná hodnota součinu $\sigma_K \cdot s$ klesat.

Zvětšením součinu $\sigma_K \cdot s$ (nastává při tažení plechu) dochází k ovlivnění napjatosti a rozložení deformací tvářeného polotovaru. V počáteční fázi procesu tažení není materiál ovlivněn tvářením a jeho anizotropie i tloušťka plechu je konstantní v souladu s membránovou teorií polotovarů. V dalších fázích působí na průběh deformace čím dál více vliv anizotropie tvářeného polotovaru, který vyplývá ze vzrůstu součinu $\sigma_K \cdot s$ v nejvíce deformovaných místech. Tato místa se zpevňují více než jejich okolí a projevují se větším odporem proti dalším plastickým deformacím. Díky tomu dochází k částečnému vyrovnání deformací v polotovaru. To znamená, že v nejvíce deformovaných místech bude tloušťka větší než u membránového modelu, naopak v místech, kde podle membránové teorie k deformaci nedochází, bude zaznamenán úbytek tloušťky plechu. Příklad průběhu deformací je znázorněn na obr. 4.9.

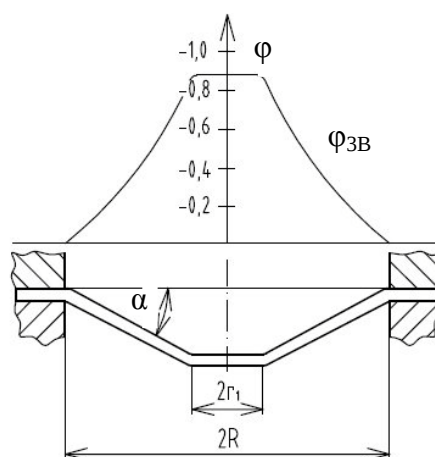


Obr. 4.9 Rozložení deformací při tažení kulového a kuželového výtažku [8]



$$\varphi_{3Bmax} = 2 \ln \frac{2R - h}{2R}$$

Obr. 4.10 Ztenčení polotovaru při kulovém výtažku[8]



$$\varphi_{3Bmax} = -2 \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_1}$$

Obr. 4.11 Ztenčení polotovaru při kuželovém výtažku[8]

Z obr. 4.9 vyplývá, že skutečná maximální logaritmická deformace plechu φ_{3max} je menší než hodnota φ_{3Bmax} , která byla určena podle vzorců z obr. 4.10, 4.11. Dále pak φ_{3max} musí být vyšší než střední logaritmická deformace φ_{3sr} :

$$\varphi_{3sr} = \ln \frac{S_0}{S} \quad (4.4)$$

..kde: S_0 ...plocha polotovaru, S ...plocha výtažku.

Takto lze stanovit horní a dolní mez, ve které se bude nacházet skutečná maximální hodnota log. deformace φ_{3max}

$$\varphi_{sr} < \varphi_{3max} < \varphi_{3Bmax} \quad (4.5)$$

Pro určení střední hodnoty tlaku $p_{stř}$, který je potřebný k tváření plechu, například jedná-li se o výtažek tvaru kulového vrchlíku, doporučuje [8] vztah:

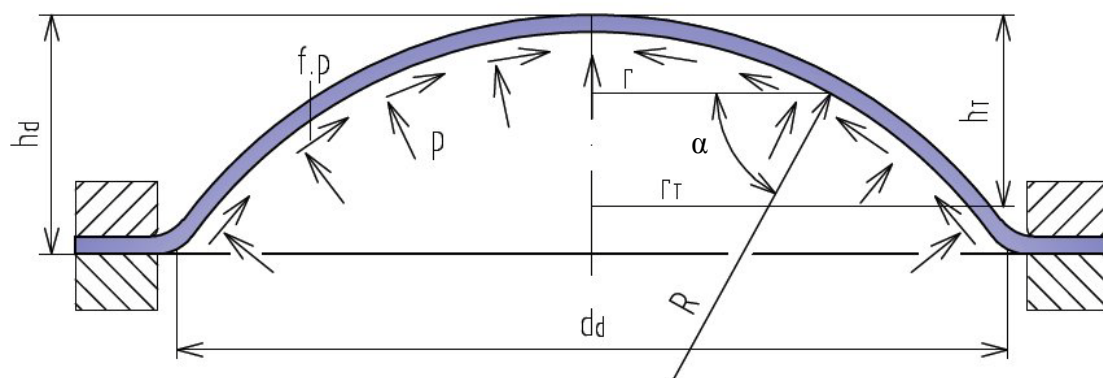
$$p_{stř} = \frac{S_0}{\left(R_k - \frac{1}{3}h_d\right)} \cdot \sigma_K \quad [MPa] \quad (4.6)$$

..kde: s_0 ...počáteční tloušťka plechu, K ...mez kluzu, R_k ...poloměr vrchlíku výtažku, h_d ...výška vrchlíku.

Je zřejmé, že výsledky získané na základě membránového modelu polotovaru se budou lišit od skutečných hodnot. Důvodem nepřesností jsou zjednodušující předpoklady, které zanedbávají vliv různých faktorů v průběhu procesu:

- tuhost plechu, kdy rozhodující vliv má tloušťka plechu. Čím je plech slabší, tím více se jeho vlastnosti blíží vlastnostem membrány, což vede k přesnějším výsledkům,
- tření tvářeného plechu o povrch nástroje,
- již zmíněné zpevňování materiálu.

Tváření pryží/polyuretanem s uvažováním třecích sil



Obr. 4.12 Schéma zatížení prolisu při tváření pryží (s uvažováním tření) [3]

Při tváření nepevným nástrojem (obr. 4.12) je vnitřní strana přístřihu v kontaktu s nástrojem a působí zde třecí síly směrem k vrcholu prolisu. To má za následek, v porovnání s tvářením kapalinou, vznik přídavných napětí. Celkové prodloužení výlisku v meridiálním směru je složeno ze složky vzniklé tlakem nástroje a složky vzniklé vlivem třecích sil. Velikost třecí síly působící v průřezu, kde vzdálenost od vrcholu je h :

$$F_f = fp2\pi Rh \quad (4.7)$$

..kde: f ...součinitel tření, p ...měrný tlak, R ...poloměr prolisu.

4.6 Charakteristika elastomerů [10], [12], [15]

Vlastnosti pryže

Tvrdost pryže pro využití v tvářecích operacích se udává v rozsahu (30 až 80) °Sh, přičemž tvrdé pryže (70 až 80) °Sh jsou vhodné pro stříhání a pro tvarovací operace jsou vhodnější měkké pryže (30 až 70) °Sh. Při vysokých měrných tlacích mají výhodnější vlastnosti měkké pryže. Tvrdé pryže mají větší ztráty otěrem a jsou náchylnější k tvorbě trhlin.

Velikost měrného tlaku v pryžovém bloku je orientačně uveden v tab. 4.3. Největší měrný tlak $p = 35$ MPa (uveden v tabulce) nemá být překračován z důvodu životnosti pryže. Měrné tlaky je však možno dosahovat vyšší $p = (80 \text{ až } 100)$ MPa.

Tab. 4.3 Příklady měrných tlaků v pryžovém bloku [15]

Tvářecí operace	Tvrdość pryže H_p [°Sh]	Měrný tlak pryže p [MPa]
Tažení: měkké plechy ($\sigma_{pt} < 150$ MPa) tloušťka do: $s_0 = 0,5$ mm $s_0 = 0,8$ mm $s_0 = 1,2$ mm středně tvrdé plechy ($\sigma_{pt} < 150$ MPa) tloušťka do: $s_0 = 0,5$ mm	30 až 40 40 až 50 50 až 60 50 až 60	20
Jednoduché ohýbání: měkké plechy do $s_0 = 1,5$ mm středně tvrdé plechy $s_0 = 1$ mm	65 65	35
Stříhání: měkké plechy do $s_0 = 1,5$ mm středně tvrdé plechy $s_0 = 0,8$ mm	70 80	35

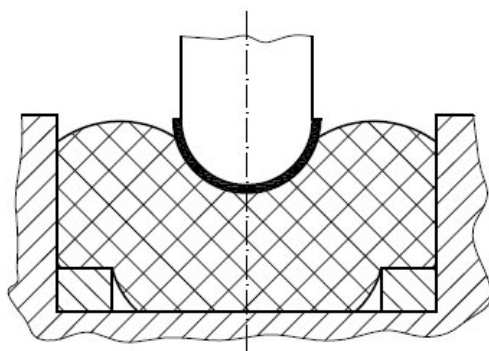
Vlastnosti polyuretanu

V porovnání s pryží má polyuretan vysokou životnost z hlediska otěruvzdornosti i elastického chování. Dále pak je schopen přenášet vyšší měrné tlaky (až do 1000 MPa). Zachovává si vysokou elasticitu (až 700% v tahu) i za vysokých hodnot tlaku. Vysoká odolnost proti opotřebení a stárnutí (v porovnání s přírodním a syntetickým kaučukem). Polyuretan je vyráběn v mnoha variantách o různé tvrdosti, díky čemuž má velké uplatnění v různých technologických aplikacích, jako jsou ohýbání, ražení, stříhání, tažení atp.

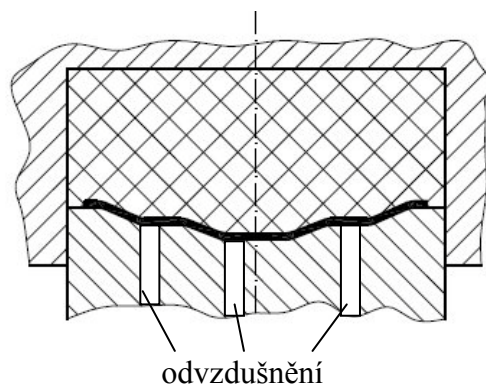
Mezi nedostatky polyuretanu patří malý rozsah provozních teplot, které jsou v intervalu $(-50 \text{ až } +70)^\circ\text{C}$. Po překročení hranice 70°C dochází ke ztrátě elastických vlastností. Zatímco pryž umožňuje tváření až při 350°C .

Tvářecí síla

Využívá se dvou základních principů použití elastomeru v nástroji. Nástroj uzavřený (obr. 4.14) a otevřený (obr. 4.13)



Obr. 4.13 Otevřený nástroj [10]



Obr. 4. 14 Uzavřený nástroj [10]

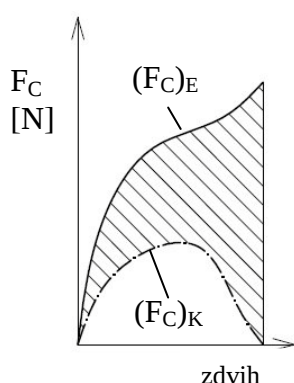
Nástroje otevřeného je například využíváno ke tváření plechu ohybem. Pohyb elastomeru není omezen uzavřeným prostorem.

Nástroj uzavřený se používá např. pro mělké tažení, kde elastomer zastává funkci tažníku. V konečné fázi se elastomer nemůže přemísťovat vlivem nedostatku místa, a tak nastává pružná deformace. Probíhá kalibrace výtažku, která je doprovázena velkým nárůstem síly.

Obecně je možné tvrdit, že tvářecí síla F_C je dána součtem dílčích sil, a to:

$$F_C = F_{tv} + F_f + F_E \quad (4.8)$$

..kde: F_{tv} ...síla potřebná pro vlastní tváření, F_f ...síla pro překonání třecích odporů, F_E ...síla potřebná k přemístění elastomeru a jeho tvarové změně.



Obr. 4.15 Průběh tvářecí síly při tváření elastomerem [10]

Z toho vyplývá, že při tváření elastomery musí být celková deformační práce větší, než při použití konvenčního nástroje (obr. 4.15).

$(F_C)_E$...průběh síly při tažení elastomerovým nástrojem, $(F_C)_K$...průběh síly při tažení konvenčním nástrojem.

Dále je možné psát:

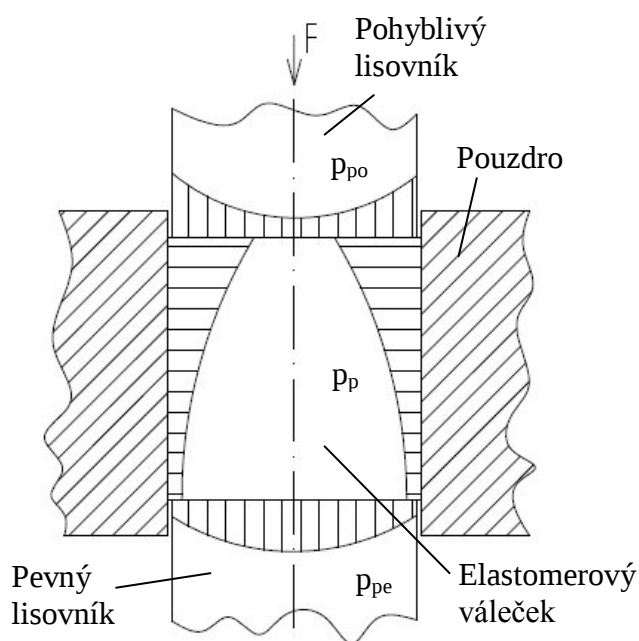
$$F_C = p \cdot S \quad (4.9)$$

..kde: p ...měrný tlak bloku, S ...plocha styku bloku s přístřihem.

Rozložení měrného tlaku p

Literatura [12] odkazuje na experiment, který se zabýval rozložením tlaku při stlačování elastomerového válečku. Tlak byl snímán nejen na spodním a horním lisovníku, ale i na stěně pouzdra, které obepínalo stlačovaný váleček.

Výsledkem byl průběh naznačený na obr. 4.16. Tlak působící na horním pohyblivém lisovníku byl maximální u stěn pouzdra, oproti tomu tlak působící na spodním (pevném) lisovníku byl maximální uprostřed lisovníku. V případě tlaku na boční stěnu pouzdra se tlak snižuje od horního ke spodnímu lisovníku.



p_{po} ... průběh tlaku na pohyblivém lisovníku,
 p_{pe} ... průběh tlaku na pevném lisovníku,
 p_p ... průběh tlaku na pouzdru.

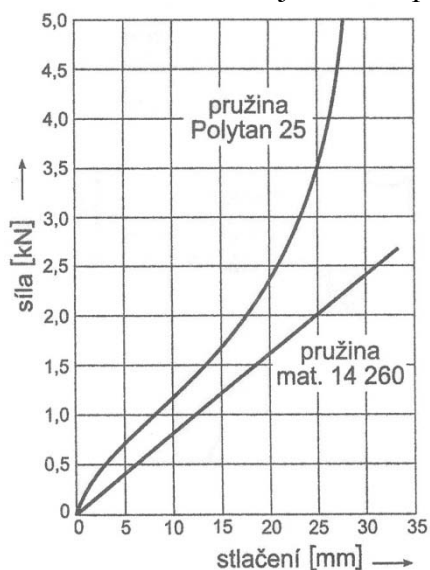
Obr. 4.16 Rozložení tlaku [12]

Deformační chování elastomeru

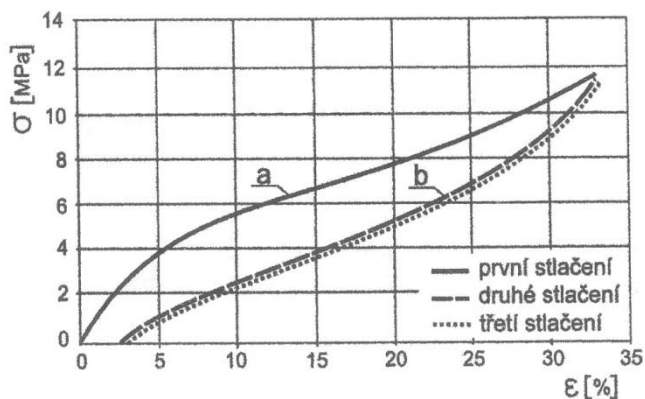
Chování elastomeru při zatížení je ovlivněno mnoha faktory, jako jsou tvrdost, kontrakce, tažnost, modul pružnosti, přirozený přetvárný odpor, tvarový součinitel, objem a konstrukční řešení elastomerového bloku.

a) Deformační odpor elastomerů

Deformační odpor, potažmo přirozený přetvárný odpor, lze určit ze základní pěchovací zkoušky. V potaz však musíme brát, že přirozený přetvárný odpor je ovlivněn materiálovými charakteristikami a dalšími činiteli (tvarový součinitel, vliv čela, tření atp.). Příklad průběhu deformační síly při stlačování elastomeru je vidět na obr. 4.17. Na obr. 4.18 je uveden příklad průběhu křivky $\sigma_p = f(\varepsilon)$.



Obr. 4.17 Průběh deformační síly při stlačování polyenové pružiny [10]



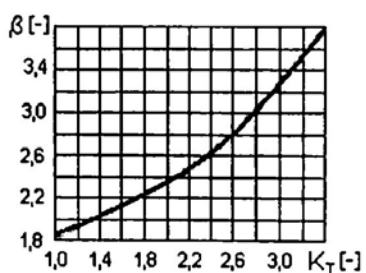
Obr. 4.18 Průběh napětí při spěchování vzorku polyuretanu [10]

Pro výpočet síly při stlačování elastomerového bloku je znám vztah [10]:

$$F = \beta \cdot \frac{1}{3} \cdot E_e \cdot S_0 \cdot \left(\frac{1}{\lambda^2} - \lambda \right) \quad (4.10)$$

..kde: S_0 ...počáteční čelní plocha bloku, E_e ...modul pružnosti elastomeru, λ ...deformační činitel,

$$\lambda = 1 - \frac{\Delta h}{h_0} \quad (4.11)$$

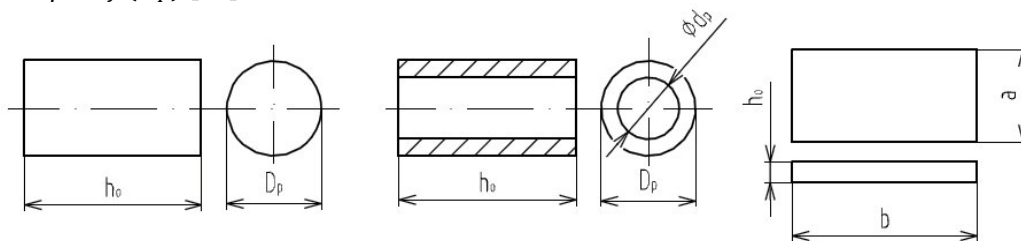


Obr. 4.19 Znárodnění závislosti $\beta = f(K_T)$ [10]

Δh ...stlačení bloku původní výšky h_0 , β ...koeficient tuhosti ve smyslu způsobu upnutí čela bloku, lze určit ze závislosti $\beta = f(K_T)$ daného elastomeru (obr. 4.19)

b) Tvarový součinitel K_T

Tvar a rozměr elastomerového bloku ovlivňuje jeho deformační chování. K_T lze vypočítat jako poměr plochy zatížené lisováním k volné ploše bloku.



Obr. 4.20 Schéma vybraných elastomerových bloků [10]

a) válcový tvar bloku (obr. 4.20):

$$K_T = \frac{\pi D_p^2}{4 \cdot \pi D_p h_0} = \frac{D_p}{4 \cdot h_0} \quad (4.12)$$

b) hranol (obr. 4.20):

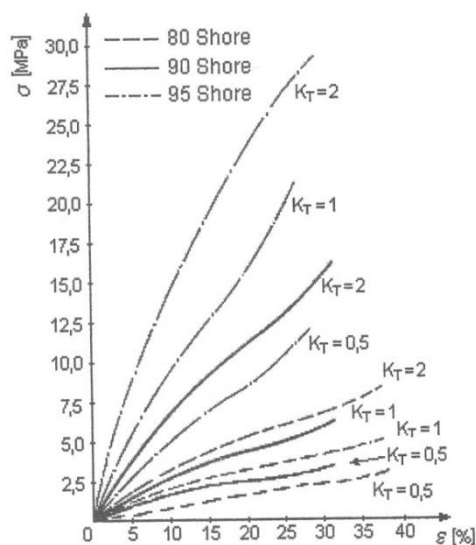
$$K_T = \frac{ab}{2 \cdot h_0(a+b)} \quad (4.13)$$

c) válcový tvar s průchozí dírou (obr. 4.20):

$$K_T = \frac{D_p - d_p}{4 \cdot h_0} \quad (4.14)$$

Tab.4.4 Hodnoty zkoušených vzorků [10]

Tvrdość [ShA]	D [mm]	h_0 [mm]	K_T [-]	max ε [%]
80	43	21,5	0,5	33
		43	0,25	
90	43	21,5	0,5	
		43	0,25	



Obr. 4.22 Křivky závislosti
 $\sigma = f(Sh - K_T)$ [10]

(za konstantního průměru D) klesá tuhost vzorku. V případě obr. 4.22 měly přechované vzorky tvar hranolu.

c) Modul pružnosti

Vztah podle Hookova zákona může být aplikován pouze v rozsahu malých deformací

($\varepsilon < 10\%$), a to dle druhu elastomeru.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F h_0}{S \Delta h} \quad (4.15)$$

..kde: F ...zatěžující síla, S ...velikost průřezu, h_0 ...počáteční výška elastomerového bloku, Δh ..změna původní výšky.

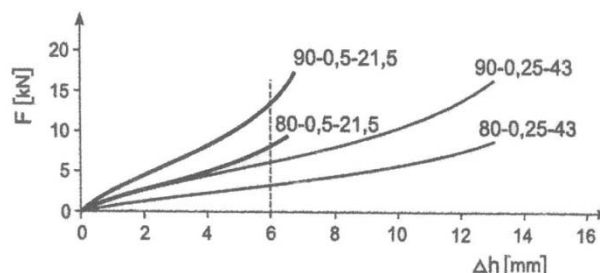
Ve firmě GUMOTEX Hradec Králové byl experimentálně ověřen vztah, ve kterém je modul pružnosti funkcí tvarového součinitele a tvrdosti $E = f(K_T, {}^0Sh)$. Vztah je vztažen na oblast malých deformací ($\varepsilon < 10\%$).

$$E = \left[\left(\frac{Sh}{10} \right)^{\frac{5,7 \cdot Sh}{1000}} + 10 \right] K_T^{1,62} + 0,82 \left(\frac{Sh}{10} \right)^2 + 10 \quad [kp \cdot cm^{-2}] \quad (4.16)$$

Další možností zjištění modulu pružnosti elastomeru je metoda vtlačování válcového lisovníku do pouzdra s elastomerem. Výsledek ovlivňuje tvar vnikajícího lisovníku, hloubka ponoření do lisovníku, čas pronikání a doba setrvání v ponoru při měření. Vzorec pro výpočet má pak následující podobu:

$$E = \frac{0,75 \cdot F}{D_L \cdot \Delta h_L} \quad (4.17)$$

..kde: F ...síla vtlačení, D_L ...průměr lisovníku, Δh_L ..hloubka vnoření lisovníku.



Obr. 4.21 Vliv tvrdosti polyuretanu [10]

Při přechování vzorků z tab. 4.4 se projevuje vliv tvrdosti polyuretanu a tvarového součinitele K_T , jak je znázorněno na obr. 4.21. Označení křivek odpovídá sledu hodnot $Sh - K_T - h_0$.

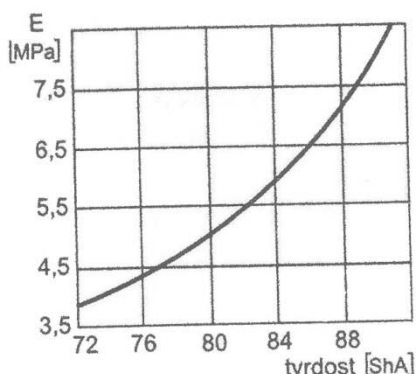
S růstem tvrdosti roste tuhost, tedy deformační odpor. S růstem výšky

Na obr. 4.23 je vidět závislost modulu pružnosti na tvrdosti elastomeru. Pro zjištění přibližných hodnot modulu pružnosti bylo využito přítlačného tvrdoměru (např. Shoreho přístroj).

Na základě experimentu je doporučen vztah:

$$E = 2,2 \cdot \frac{7,2 + B}{100 - B} \quad (4.18)$$

..kde: B...počet stupňů na stupnici Shore [°Sh].



Obr. 4.23 Závislost modulu pružnosti elastomeru E na tvrdosti elastomeru [10]

Elastomerové nástroje využívané při tváření pracují za vyšších hodnot deformací než pružiny. Z toho vyplývá, že výše popsané způsoby určení modulu pružnosti jsou orientační.

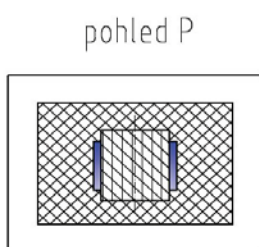
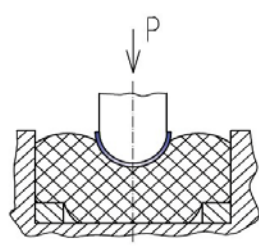
Příklad výpočtu síly potřebné k přemístění elastomeru a jeho tvarové změně F_E

Stanovení této síly je často obtížné. Při výpočtu musí metodika řešení odpovídat danému technologickému schématu. Na obr. 4.24 je naznačen případ lisování dílce tvaru U, ke kterému

je doporučen následovný výpočet F_E :

$$F_E = E_e \cdot K_T \cdot S_L \cdot \frac{V_e}{V} \quad (4.19)$$

..kde: V_e ..objem elastomeru přemísťovaný do volné plochy S_v , V ..celkový objem elastomerového bloku, E_e ..modul pružnosti elastomeru, S_L ..průmětová plocha lisovníku, K_T ..tvarový součinitel.



S_e ..plocha elastomer. dílce,



S_v ..průmětová volná plocha elastomeru,



S_L ..průmět. plocha lisovníku



Obr. 4.24 Pracovní schéma tváření elastomerem [10]

5 NÁVRH VÝROBY SOUČÁSTI

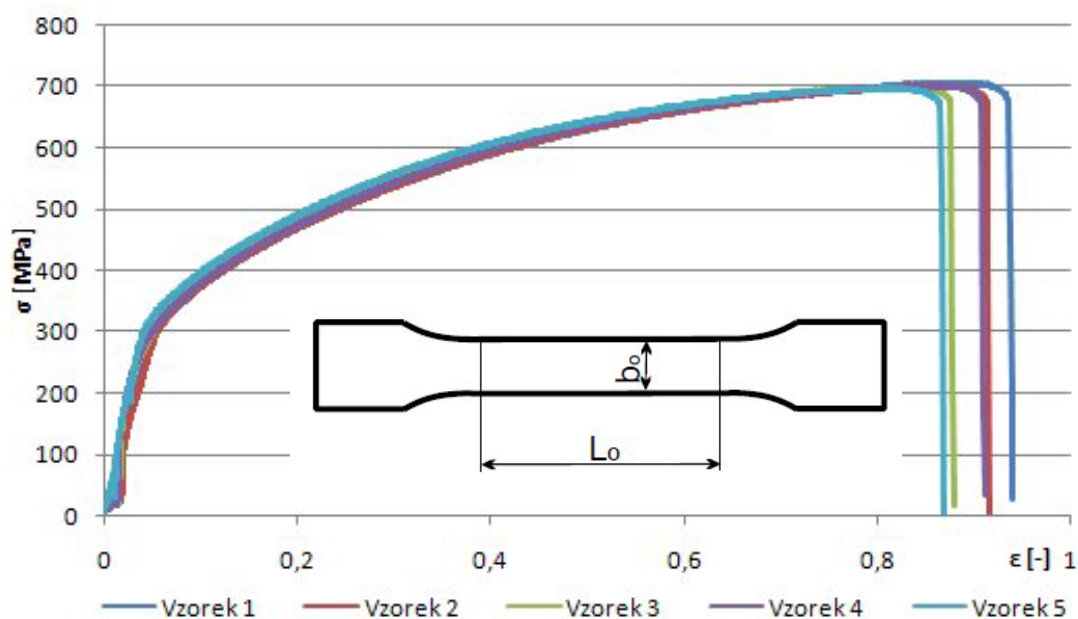
Níže je představeno vlastní řešení návrhu nástroje, kterým se docílí strukturovaného povrchu horního dílu absorberu v podobě kuželových prolisů.

5.1 Materiál polotovaru

Pomocí tahové zkoušky byly zjištěny základní mechanické charakteristiky nerezového plechu 17 240 o tloušťce s_0 . Zkouška byla provedena z pěti vzorků (orientovaných podél směru válcování plechu) na hydraulickém zkušebním stroji ZD 40. Pomocí programu M-TEST v.1.7 bylo provedeno vyhodnocení (tab. 5.1). Grafické znázornění je uvedeno na obr. 5.

Tab. 5.1 Vyhodnocení tahové zkoušky

Vzorek	L_0 [mm]	s_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	R_{p02} [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
1	80	0,5	25	12,5	8822,8	270,9	705,8	50
2					8747,2	309,3	699,8	49,4
3					8728,4	269,4	698,3	50
4					8766	279,2	701,3	49,4
5					8719,2	302,5	697,5	50



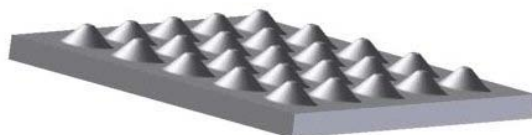
Obr. 5 Závislost napětí na poměrné deformaci

5.2 Návrh nástroje

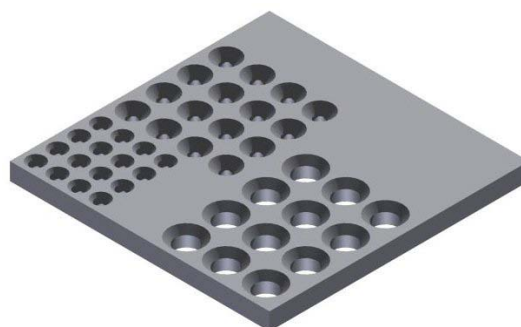
Při volbě velikosti experimentálního nástroje bylo třeba zohlednit dva protichůdné požadavky:

- Pro zhotovení funkčního vzorku panelu absorbéru, na kterém bude možné prověřit funkci navržené koncepce, je výhodné vytvoření povrchově strukturovaného plechu co největší velikosti.
- Velikost vzorků je limitována velikostí a uspořádáním pracovního prostoru lisu, na kterém bylo možno experimenty provést, tj. hydraulického lisu CZR600.

Návrh matrice



Obr. 5.1 Varianta I



Obr. 5.2 Varianta II

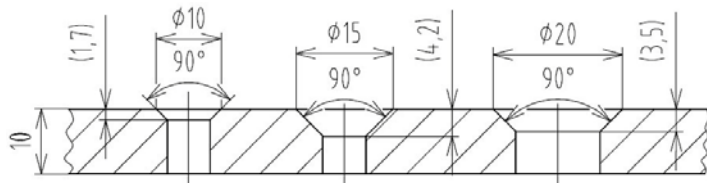
Varianta I

Jedná se o provedení tažníku (obr. 5.1), který je z ocelové desky o rozměrech (150x150x10) mm s kuželovými výstupky. Varianta se jeví jako optimální, ovšem po bližší analýze jde o variantu nevhodnou, a to zejména kvůli obtížné a nákladné výrobě. Variantu NEVOLÍM.

Varianta II

Ocelová deska ve formě tažnice o rozměrech (150x150x10) mm s kuželovými otvory (obr. 5.2) zhotovená zahlubováním. Jednoduchá, rychlá a nenákladná varianta. Variantu VOLÍM.

Pro obtížnou predikci vhodného vstupního průměru kuželového otvoru d_a jsou zvoleny 3 vstupní průměry, a to $d_a = \varnothing 10, \varnothing 15, \varnothing 20 \text{ mm}$. Rozměry jednotlivých otvorů jsou vidět na obr. 5.3. Hrana na vstupním průměru každého kuželového otvoru je zaoblena na hodnotu $R = 0,5 \text{ mm}$.



Obr. 5.3 Schéma otvorů v tažnici

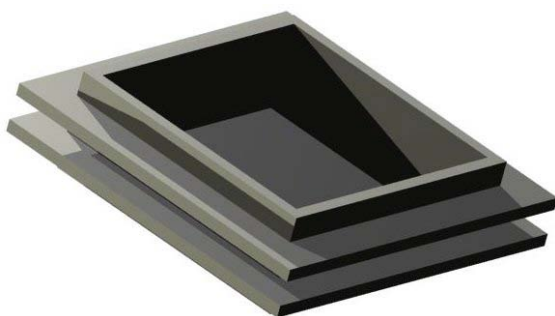
Materiál tažnice: zvolena konstrukční ocel 11 373 (S235JRG1). Chemické složení a základní mechanické charakteristiky materiálu jsou uvedeny v tab. 5.2.

Tab. 5.2 Chemické složení a základní mechanická charakteristika [34]

C [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]	N [hm. %]	Re [MPa]	Rm [MPa]
max. 0,17	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,007	min. 235	340 - 470

Návrh kontejneru:

Obr. 5.4 Varianta I



Obr. 5.5 Varianta II

Varianta I

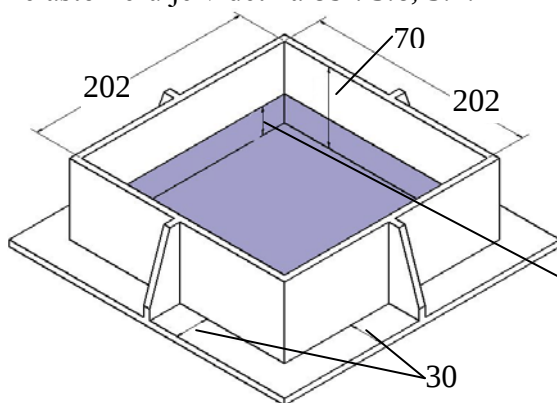
Kontejner (obr. 5.4) je svařen z ocelových desek o tloušťce 6 mm. Pro větší odolnost je kontejner vybaven výstužnými žebry.

Varianta II

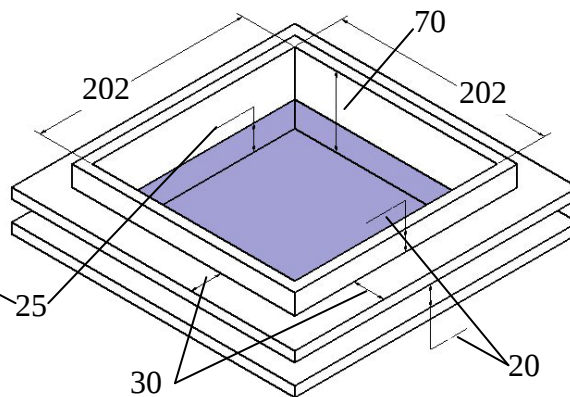
V případě, kdy varianta I nesplní pevnostní podmínky při zatěžování, přistoupí se k variantě II. Tento kontejner (obr. 5.5) je svařen z ocelových desek o tloušťce 10 mm a je opatřen dvěma objímkami.

Materiál kontejneru: zvolena konstrukční ocel 11 373 (S235JRG1)

Základní rozměry kontejneru v milimetrech a vyznačená oblast působení tlaku elastomeru je vidět na obr. 5.6, 5.7.



Obr. 5.6 Základní rozměry kontejneru varianty I

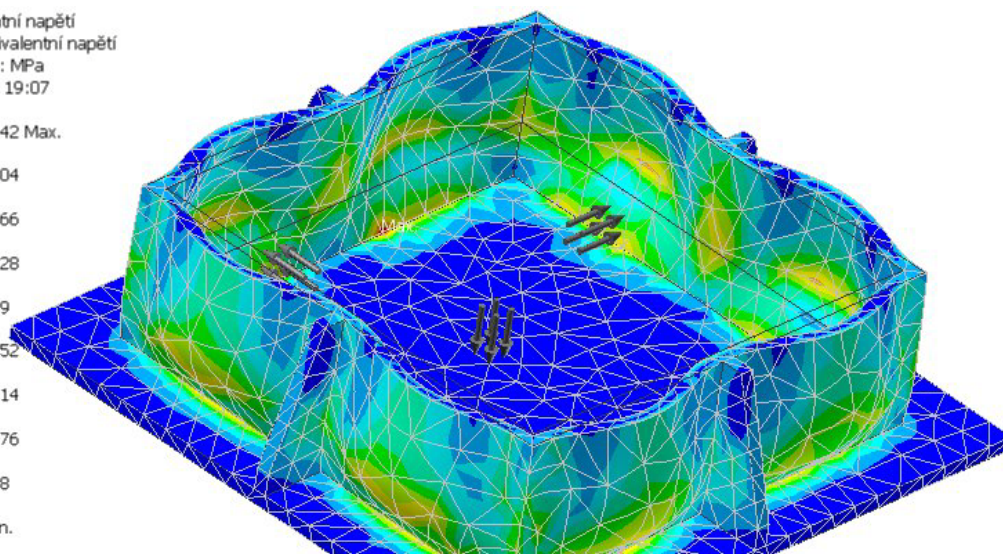
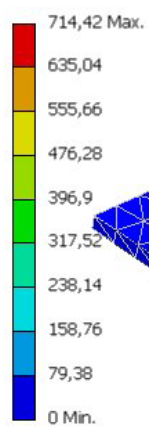


Obr. 5.7 Základní rozměry kontejneru varianty II

Na základě pevnostní a deformační analýzy (obr. 5.8-11) se rozhodne, zda bude pro experiment použita varianta kontejneru I nebo II. Analýza je provedena v programu Autodesk Inventor Professional 2008. Jelikož program neumožňuje detailnější nastavení parametrů potřebných pro přesnější výpočet, slouží tyto výsledky pouze jako orientační.

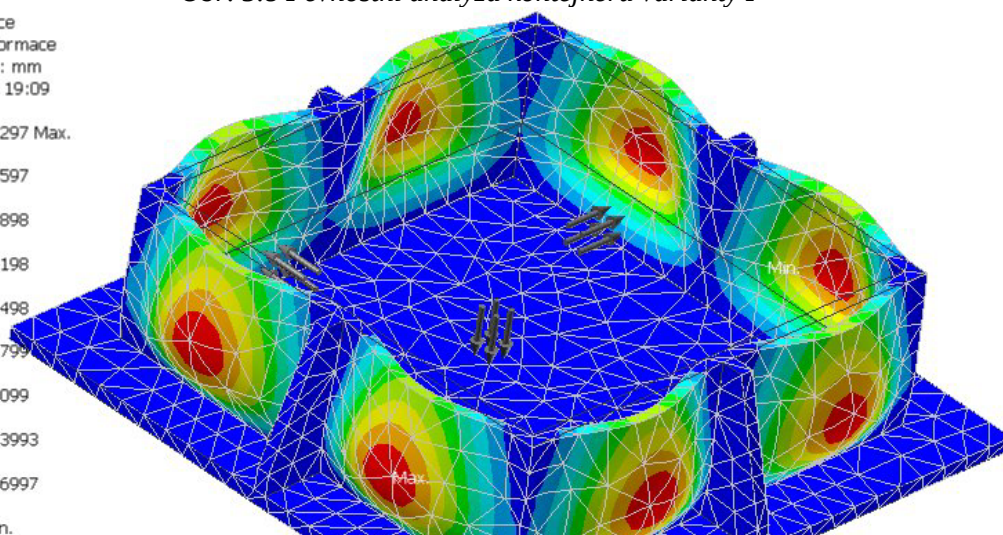
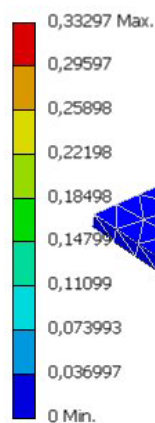
Kontejner bude zatížen tlakem $p = 75 \text{ MPa}$ na ploše označené fialovou barvou tak, jak je znázorněno na obr. 5.6-7.

Ekvivalentní napětí
Typ: Ekvivalentní napětí
Jednotka: MPa
1.4.2012 19:07



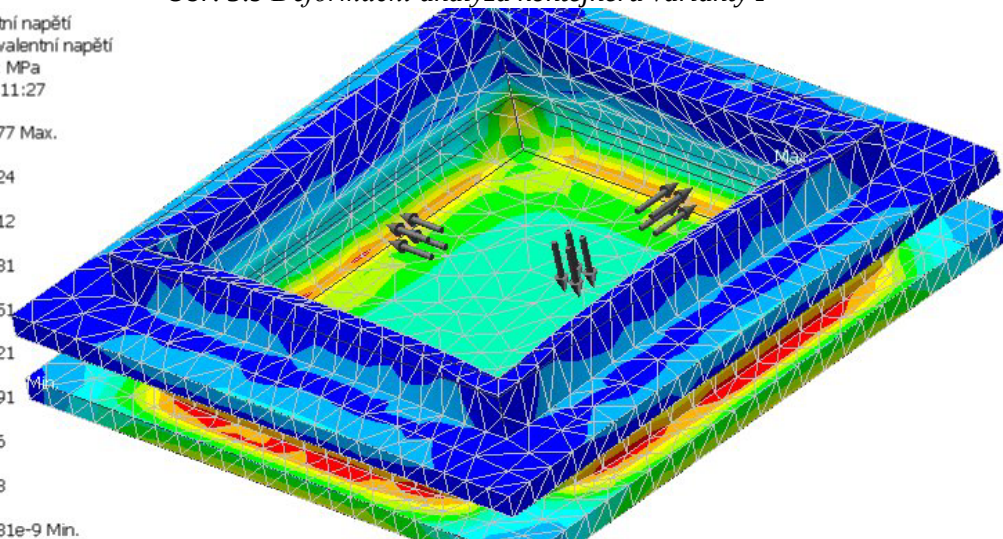
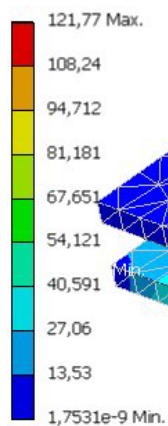
Obr. 5.8 Pevnostní analýza kontejneru varianty I

Deformace
Typ: Deformace
Jednotka: mm
1.4.2012 19:09

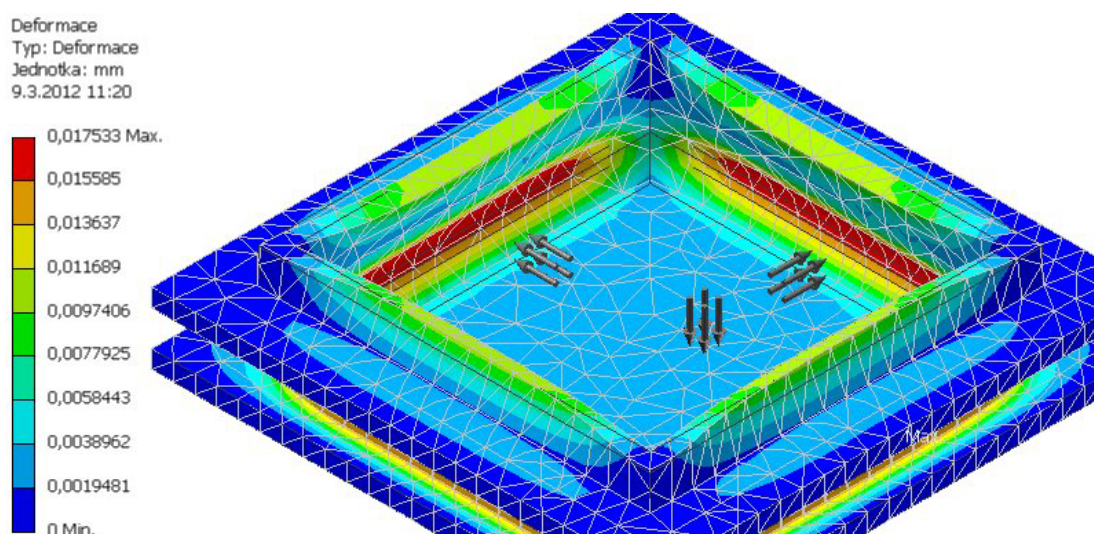


Obr. 5.9 Deformační analýza kontejneru varianty I

Ekvivalentní napětí
Typ: Ekvivalentní napětí
Jednotka: MPa
9.3.2012 11:27



Obr. 5.10 Pevnostní analýza kontejneru varianty II

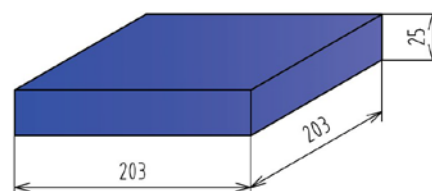


Obr. 5.11 Deformační analýza kontejneru varianty II

Vzhledem k příznivějšímu výsledku pevnostní a deformační analýzy u varianty II, bude zvolen kontejner v nabízené variantě II.

Návrh elastického bloku:

Experiment je proveden pomocí bloků z polyuretanu a pryže. Rozměry obou bloků jsou shodné (obr. 5.12), a to (203 x 203 x 25) mm. Upevnění v kontejneru je zajištěno zalisováním.



Obr. 5.12 Schéma bloku

Polyuretan

Barva: žlutá

Tvrdost: 90 ShA

Modul pružnosti v tahu

$E = 70 \text{ MPa}$

Pryž

Barva: černá

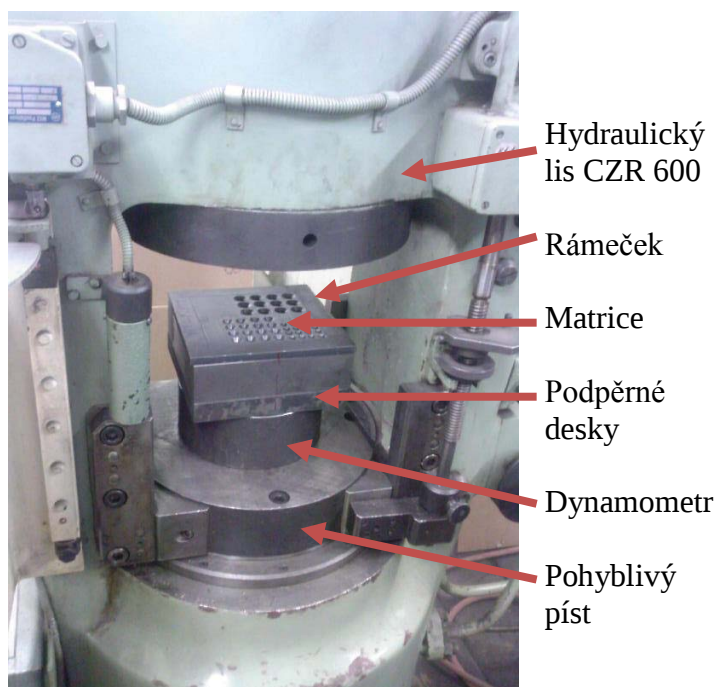
Tvrdost: 65 ShA

Sestava nástroje

Sestava nástroje (obr. 5.13) se skládá z kontejneru (obr. 5.14), pryžového/polyuretanového bloku, rámečku, matrice a podpěrných desek. Jednotlivé díly nejsou pevně spojeny, protože se nepředpokládají žádné posuvové síly. Po vložení přístřihu plechu (0,5x200x200) mm na matrici následuje umístění kontejneru na přístřih. Pohyblivý píst následně vyjíždí nahoru proti pevnému rámu lisu, o který se opře kontejner, v němž dochází ke stlačování pryže/polyuretanu. To vede k samotnému tváření přístřihu plechu. Jakmile se pohyblivý píst vrátí do původní polohy, odstraní se kontejner a vyjme se hotový dílec.



Obr. 5.14 Kontejner se zalisovaným pryžovým/polyuretanovým blokem



Obr. 5.13 Lis se spodní částí nástroje

5.3 Výpočet tvářecí síly a ztenčení plechu

5.3.1 Výpočet celkové tvářecí síly F_C

Pro zvolení vhodných podmínek lisování byla před vlastním experimentem vypočtena orientační velikost potřebné celkové lisovací síly F_C . Výpočet je proveden pro vstupní průměr kuželového otvoru $d_d=20\text{mm}$ a výšku prolisů $h_d=5\text{mm}$, kde jsou prolisy (pro zjednodušení výpočtu jsou uvažovány kulové prolisy) rozmístěny na ploše přístřihu $200 \times 200\text{ mm}$.

$$F_C = F_E + F_{tv} + F_f$$

Síla potřebná k přemístění elastomeru a jeho tvarové změně F_E

Pro výpočet je využit vztah (4.10). Síla F_E je počítána pro elastický blok ve formě polyuretanu.

$$F_E = \beta \frac{1}{3} E_e S_0 \left(\frac{1}{\lambda^2} - \lambda \right) = 2,35 \cdot \frac{1}{3} \cdot 70 \cdot 40000 \cdot \left(\frac{1}{0,8^2} - 0,8 \right) = 1672416,7\text{ N}$$

$$S_0 = ab = 200 \cdot 200 = 40000\text{ mm}^2$$

$$E_e = 70\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \dots \text{určeno z katalogu [21]}$$

Deformační činitel λ :

$$\lambda = 1 - \frac{\Delta h}{h_0} = 1 - \frac{5}{25} = 0,8$$

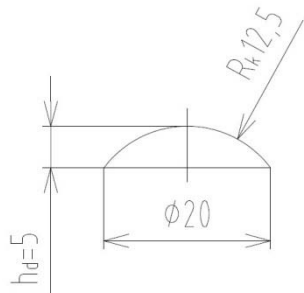
Δh ...hodnota stlačení bloku polyuretanu je orientačně zvolena $\Delta h = 5\text{mm}$

Koeficient tuhosti β :

Hodnota $\beta = 2,35$ byla určena na základě závislosti $\beta = f(K_T)$ vyjádřené v grafu na obr. 4.19.

$$K_T = \frac{ab}{2h_0(a+b)} = \frac{200 \cdot 200}{2 \cdot 25 \cdot (200 + 200)} = 2$$

pozn.: závislost $\beta = f(K_T)$ na obr. 4.19 je vztažena k jinému elastomeru, tzn., že výpočet síly F_E je pouze orientační.



Výpočet síly pro vlastní tváření F_{tv}

Tlak potřebný pro vyrobení jednotlivých prolisů:

$$\sigma_K = R_{p02} = 291 \text{ MPa}$$

$$p_{stř\phi 20} = \frac{s_0}{\left(R_k - \frac{1}{3}h_d\right)} \cdot \sigma_K = \frac{0,5}{\left(12,5 - \frac{1}{3} \cdot 5\right)} \cdot 291$$

$$p_{stř\phi 20} = 13,4 \text{ MPa}$$

$$p = \frac{F}{S} \rightarrow F_{tv} = p_{stř\phi 20} \cdot S = 13,4 \cdot (200 \cdot 200) = 537231 \text{ N}$$

Výpočet síly potřebné pro překonání třecích odporů F_f

$$F_f = f \cdot p_{stř\phi 20} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_k \cdot h_d = 0,35 \cdot 13,4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 12,5 \cdot 5 = 1841,8 \cdot 49 \text{ prolisů}$$

$$F_f = 90248,2 \text{ N}$$

f...určeno za katalogu [21], $f = 0,35$ (suché tření)

Celková tvářecí síla F_C

$$F_C = F_E + F_{tv} + F_f = 1672416 + 537231 + 90248 = 2299895 \text{ N}$$

Pro vytvoření prolisů o výšce $h_d = 5 \text{ mm}$ a průměru $d_d = 20 \text{ mm}$ je zapotřebí minimální síla lisu 2300 kN. Hydraulický lis CZR600 disponuje max. silou 6000 kN, tudíž lis je možné k experimentu využít.

5.3.2 Ztenčení plechu

Předpokládané maximální ztenčení plechu na vrcholu prolisu pro vstupní průměr kuželového otvoru $d_d = 20 \text{ mm}$ a výšku prolisu $h_d = 5 \text{ mm}$ se určí z membránového modelu polotovaru uvedeného na obr. 4.10.

$$\varphi_{3Bmax \phi 20} = 2 \ln \left(1 - \frac{h_d}{2R_k}\right) = 2 \cdot \ln \left(1 - \frac{5}{2 \cdot 12,5}\right) = -0,446$$

$$\varphi_3 = \ln(1 + \varepsilon) = \ln \left(1 + \frac{s - s_0}{s_0}\right) = \ln \left(1 + (-1) + \frac{s}{s_0}\right) = \ln \left(\frac{s}{s_0}\right)$$

$$\rightarrow e^{\varphi_3} = \frac{s}{s_0} \rightarrow s_{min} = e^{\varphi_{3Bmax}} \cdot s_0 = e^{-0,446} \cdot 0,5 = 0,32 \text{ mm}$$

Jestliže plocha prolisu je $S = 2\pi R_k h_d$ a bude-li se uvažovat plocha polotovaru, ze kterého bude prolis vyroben $S_0 = 2\pi R_k h_d - \pi h_d^2$, určí se střední hodnota ztenčení plechu následovně:

$$\varphi_{3str} = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \left(1 - \frac{h_d}{2R_k} \right) = \frac{1}{2} \varphi_{3Bmax \varnothing 20} = -0,223$$

$$s_{str} = e^{\varphi_{3str}} \cdot s_0 = e^{-0,223} \cdot 0,5 = 0,40 \text{ mm}$$

Hodnota tloušťky plechu na vrcholu prolisu bude dle výpočtu v intervalu (0,32; 0,40) mm.

5.4 Vlastní tažení

Experiment se prováděl na hydraulickém lise CZR 600, kde byl zkoumán vliv rozdílných elastických bloků (pryž/polyuretan), mazání a odvzdušnění. Celková tvářecí síla byla odstupňována v několika krocích od 500 kN do 3000 kN (tab. 5.3).

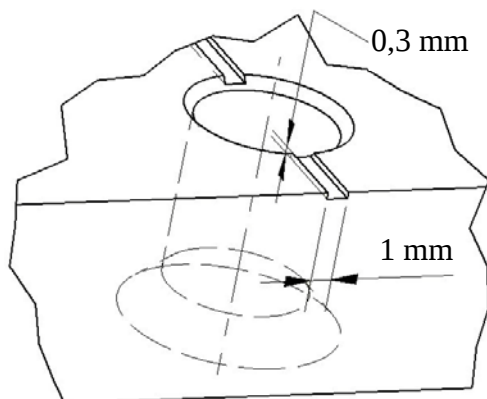
Tab. 5.3 Vstupní hodnoty

Vzorek	Elastický blok	Síla F _C [kN]	Měrný tlak p [MPa]		
vz1	Polyuretan	500	12,5	Neodvzdušněno	Nemazáno
vz2		1000	25		
vz3		1500	37,5		
vz4		2000	50		
vz5		2500	62,5		
vz6	Přyz	500	12,5		
vz7		1000	25		
vz8		1500	37,5		
vz9		2000	50		
vz10	Polyure.	2500	62,5		
vz11		3000	75		
vz13		3000	75	Mazáno	

Příklad výpočtu měrného tlaku:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{500000}{200 \cdot 200} = 12,5 \text{ MPa}$$

..kde: S ..průmětná plocha tažnice s rámečkem.



Obr. 5.15 Náčrtek odvzdušnění

Mazivo bylo použito od firmy Fuchs, a to RENOFORM 319 NAT. Mazivo je primárně určeno na protlačování, nicméně lze využít i pro tažení a lisování. Aplikace byla provedena pouze na funkční plochu matrice.

Odvzdušnění bylo provedeno vytvořením štěrbin na zadní straně matrice, jak je znázorněno na obr. 5.15.

5.5 Vyhodnocení

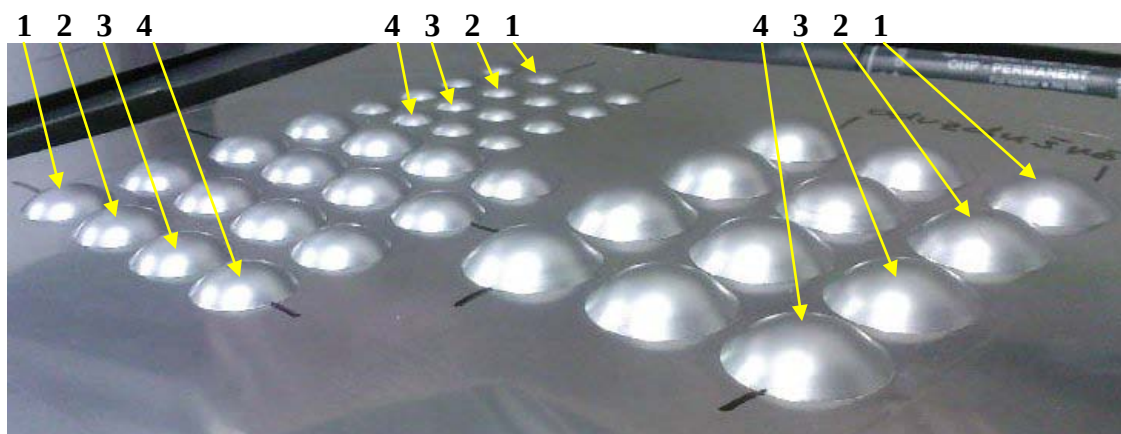
Při měření tloušťky plechu s a výšky prolisů h_d se postupovalo tak, že se vybraly vždy čtyři prolisy (obr. 5.17) z jednotlivých “sektorů”, kde $d_d=10, 15, 20$ mm. Hodnoty se zpracovaly a následně se stanovily průměrné hodnoty, které jsou uvedeny v tab. 5.4-6 (tloušťky plechu s). Pro vybrané hodnoty jsou vytvořeny grafy na obr. 5.18-23. Rovněž i v grafech na obr. 5.24-26 jsou hodnoty výšky prolisů h_d průměrné.

Hodnota tloušťky plechu s se měřila v pěti bodech, znázorněno na obr. 5.16.



Obr. 5.16 Měření tloušťky plechu s

Měření ztenčení plechu bylo provedeno digitálním mikrometrem Mitutoyo a měření výšky prolisů pak digitální posuvkou Sylvac a Mitutoyo.

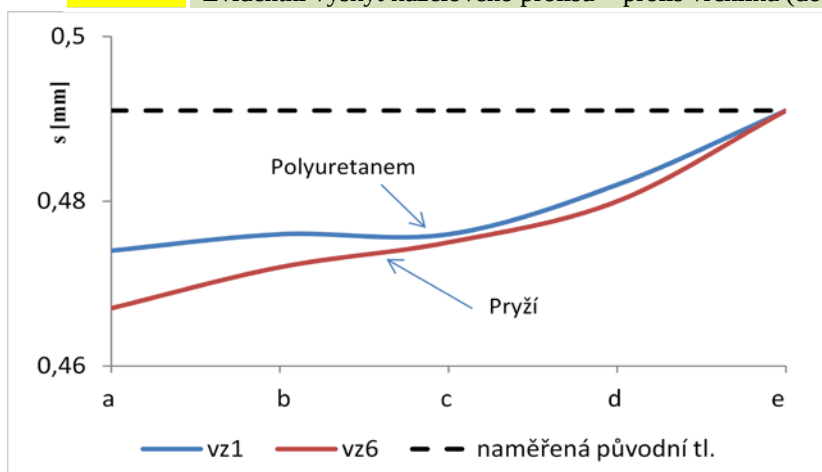


Obr. 5.17 Pořadí měření prolisů

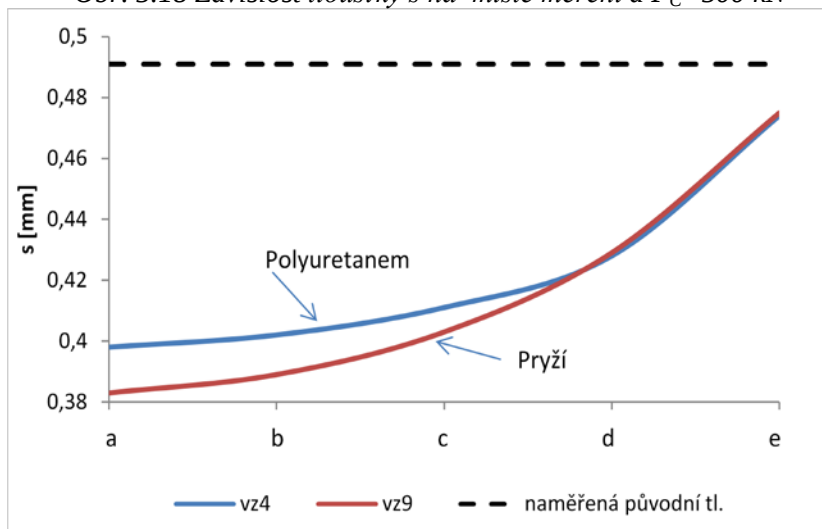
Měření tloušťky plechu pro jednotlivé vstupní průměry kuželového otvoru d_d

Tab. 5.4 Hodnoty pro vstupní průměr $d_d = 20$ mm

Vzorek	Elastický blok	Síla F_C [kN]	Místo měření tloušťky s [mm]				
			a	b	c	d	e
vz1	Polyurethan	500	0,474	0,476	0,476	0,482	0,491
vz2		1000	0,451	0,455	0,460	0,469	0,491
vz3		1500	0,425	0,428	0,440	0,455	0,478
vz4		2000	0,398	0,402	0,411	0,428	0,474
vz5		2500	0,375	0,380	0,393	0,423	0,475
vz6	Pryž	500	0,467	0,472	0,475	0,480	0,491
vz7		1000	0,442	0,446	0,459	0,471	0,491
vz8		1500	0,411	0,417	0,428	0,449	0,478
vz9		2000	0,383	0,389	0,403	0,429	0,475
vz10	Polyurethan	2500	0,381	0,390	0,405	0,431	0,475
vz11		3000	0,364	0,366	0,388	0,427	0,472
vz13		3000*	0,363	0,368	0,390	0,425	0,476
*	Povrch tažnice namazán (mazivo: RENOFORM 319 NAT)						
	Evidentní výskyt kuželového prolisu + prolis vrchlíku (do té doby pouze vrchlík)						



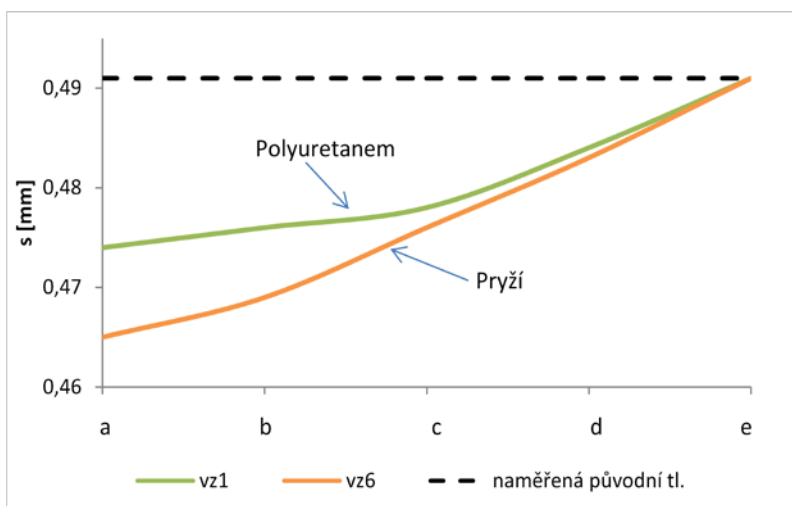
Obr. 5.18 Závislost tloušťky s na místě měření a $F_C = 500$ kN



Obr. 5.19 Závislost tloušťky s na místě měření a $F_C = 2000$ kN

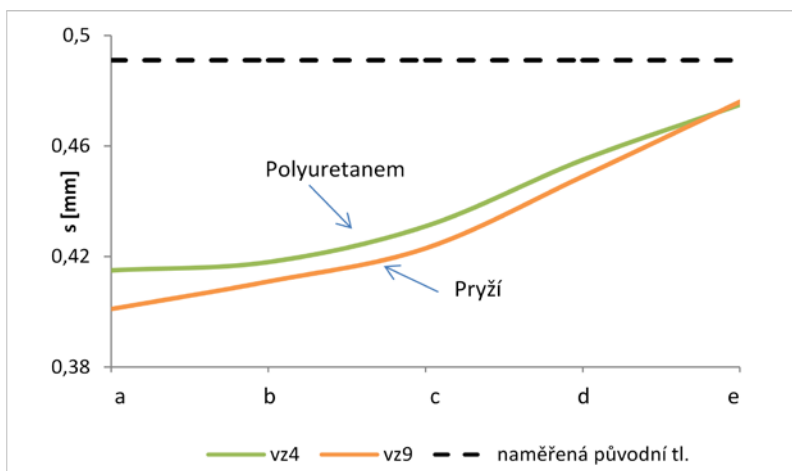
Tab. 5.5 Hodnoty pro vstupní průměr $d_d = 15 \text{ mm}$

Vzorek	Elastický blok	Síla F_C [kN]	Místo měření tloušťky s [mm]				
			a	b	c	d	e
vz1	Polyurethan	500	0,474	0,476	0,478	0,484	0,491
vz2		1000	0,456	0,458	0,462	0,474	0,491
vz3		1500	0,439	0,442	0,450	0,460	0,479
vz4		2000	0,415	0,418	0,431	0,455	0,475
vz5		2500	0,396	0,402	0,414	0,424	0,476
vz6	Pryž	500	0,465	0,469	0,476	0,483	0,491
vz7		1000	0,445	0,452	0,459	0,475	0,491
vz8		1500	0,428	0,430	0,441	0,457	0,478
vz9		2000	0,401	0,411	0,423	0,449	0,476
vz10	Polyurethan	2500	0,407	0,413	0,430	0,453	0,476
vz11		3000	0,390	0,398	0,409	0,447	0,473
vz13		3000*	0,386	0,390	0,406	0,430	0,477
*	Povrch tažnice namazán (mazivo: RENOFORM 319 NAT)						
	Evidentní výskyt kuželového prolisu + prolis vrchlíku (do té doby pouze vrchlík)						



Graf znázorňující zatížení silou 500 kN.

Ztenčování stěny probíhá jen ve vyboulené části plechu

Obr.5.20 Závislost tloušťky s na místě měření a $F_C=500 \text{ kN}$ 

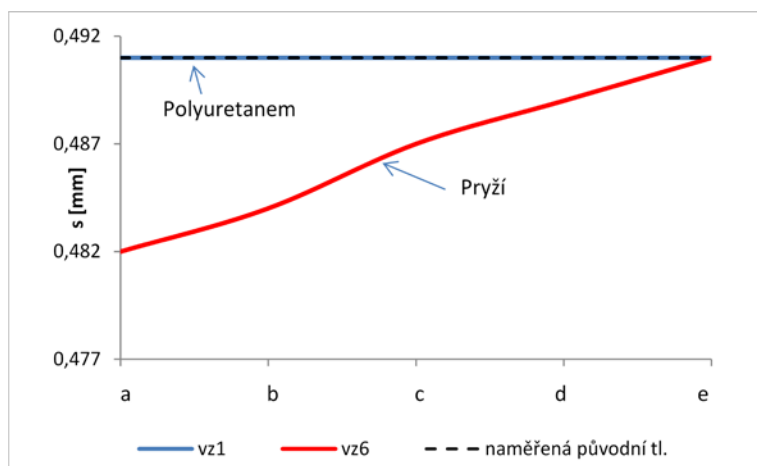
Graf znázorňující zatížení silou 2000 kN.

Ztenčování stěny probíhá nejen ve vyboulené části plechu, ale i v jeho okolí.

Obr.5.21 Závislost tloušťky s na místě měření a $F_C=2000 \text{ kN}$

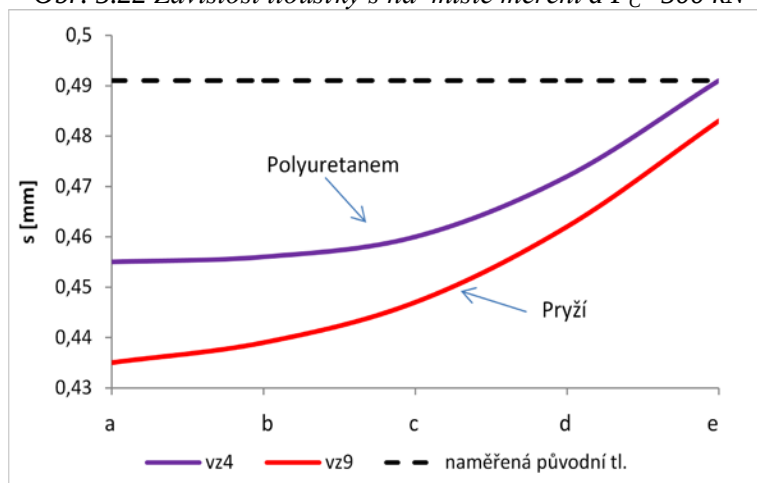
Tab. 5.6 Hodnoty pro vstupní průměr $d_d = 10 \text{ mm}$

Vzorek	Elastický blok	Síla F _C [kN]	Místo měření tloušťky s [mm]				
			a	b	c	d	e
vz1	Polyurethan	500	0,491	0,491	0,491	0,491	0,491
vz2		1000	0,474	0,477	0,481	0,489	0,491
vz3		1500	0,470	0,472	0,478	0,481	0,491
vz4		2000	0,455	0,456	0,460	0,472	0,491
vz5		2500	0,442	0,446	0,455	0,470	0,491
vz6	Pryž	500	0,482	0,484	0,487	0,489	0,491
vz7		1000	0,473	0,477	0,480	0,488	0,491
vz8		1500	0,453	0,457	0,464	0,476	0,491
vz9		2000	0,435	0,439	0,447	0,462	0,483
vz10	Polyurethan	2500	0,436	0,440	0,448	0,461	0,483
vz11		3000	0,419	0,427	0,433	0,452	0,480
vz13		3000*	0,415	0,424	0,432	0,449	0,479
*	Povrch tažnice namazán (mazivo: RENOFORM 319 NAT)						
	Evidentní výskyt kuželového prolisu + prolis vrchlíku (do té doby pouze vrchlík)						



Graf znázorňující zatížení silou 500 kN.

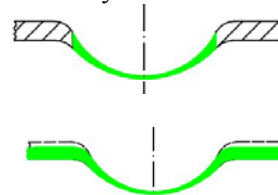
Ztenčování stěny probíhá jen ve vyboulené části plechu, a to jen v případě tváření pomocí pryže. Tváření polyuretanem nemá na ztenčení vliv.

Obr. 5.22 Závislost tloušťky s na místě měření a $F_C=500 \text{ kN}$ 

Graf znázorňující zatížení silou 2000 kN.

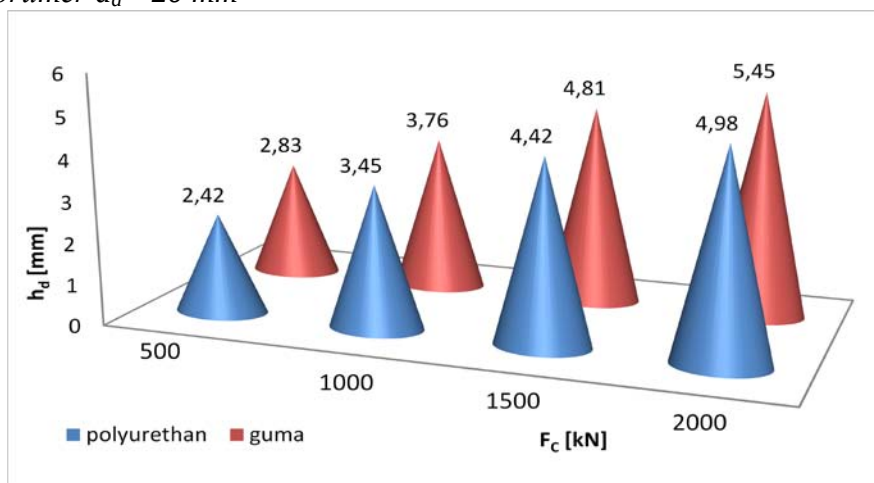
Tváření polyuretanem -> ztenčení jen ve vyboulené části.

Tváření pryží -> ztenčení i v okolí vyboulené části.

Obr. 5.23 Závislost tloušťky s na místě měření a $F_C=2000 \text{ kN}$

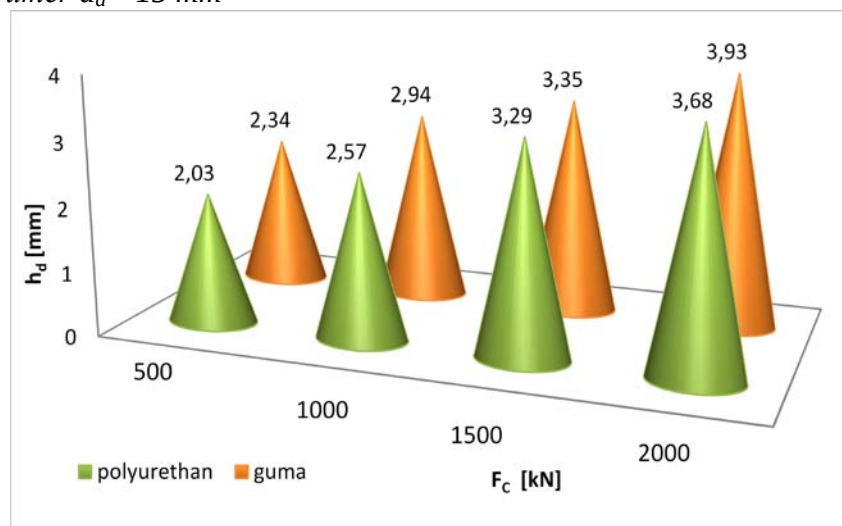
Grafy znázorňující dosaženou výšku h_d prolisu pro jednotlivé vstupní průměry kuželových otvorů d_d :

Vstupní průměr $d_d = 20 \text{ mm}$



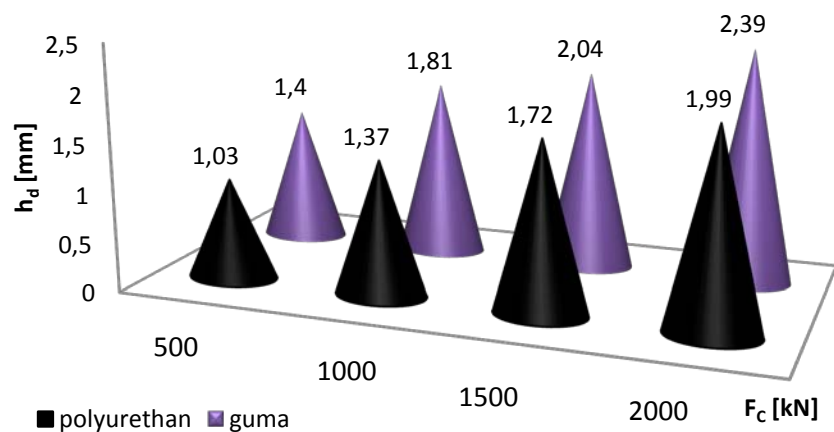
Obr. 5.24 Závislost $h_d - F_c$ pro $d_d = 20 \text{ mm}$

Vstupní průměr $d_d = 15 \text{ mm}$



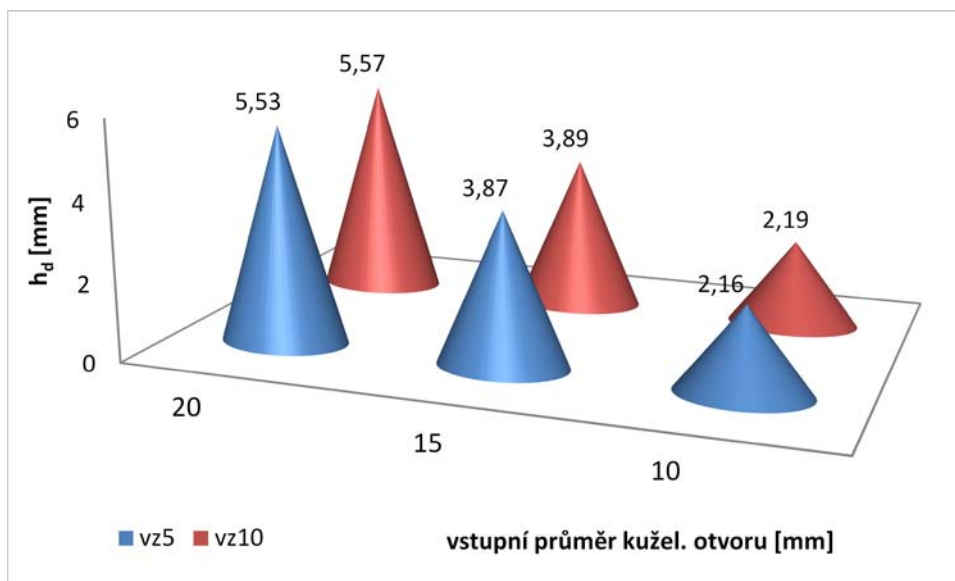
Obr. 5.25 Závislost $h_d - F_c$ pro $d_d = 15 \text{ mm}$

Vstupní průměr $d_d = 10 \text{ mm}$



Obr. 5.26 Závislost $h_d - F_c$ pro $d_d = 10 \text{ mm}$

Vliv odvzdušnění tažnice na výšku prolisu:

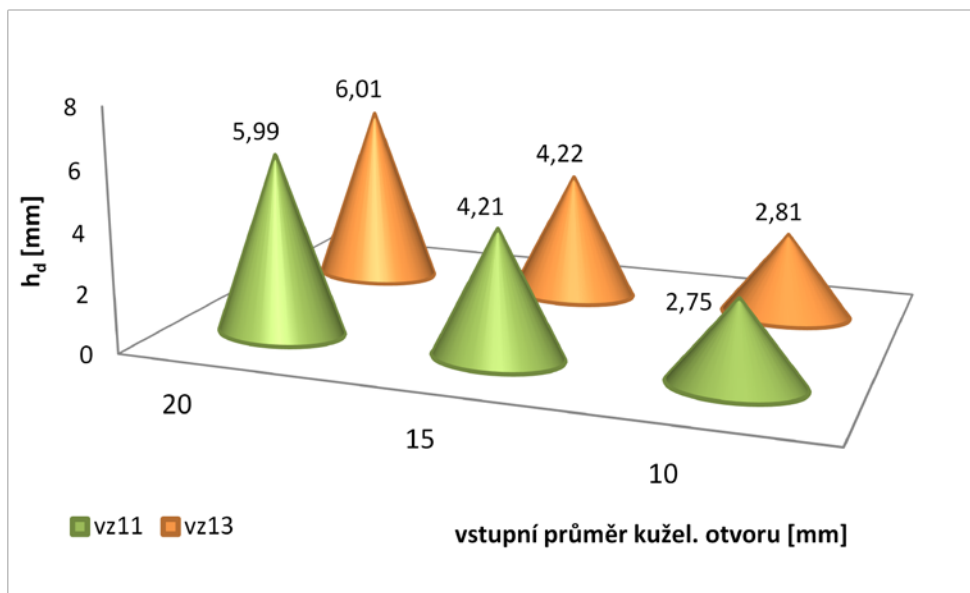


Obr. 5.27 Graf vyjadřující vliv odvzdušnění

Vliv odvzdušnění (obr. 5.27) byl zkoumán na vzorcích vz5 a vz10, přičemž celková síla tváření byla $F_c = 2500$ kN. Použitý elastický blok byl polyuretan. Odvzdušnění bylo zajištěno vytvořením štěrbin na zadní straně matrice u vzorku vz10.

Z grafu je zřejmé, že odvzdušnění nemělo na výšku prolisu podstatný vliv. Rozdíly výšek jsou v řádu 1/100 mm.

Vliv mazání tažnice na výšku prolisu:



Obr. 5.28 Graf vyjadřující vliv mazání

Vliv namazané a nenamazané matrice byl zkoumán na vzorcích vz11 a vz13, přičemž celková síla tváření byla $F_c = 3000$ kN. Použitý elastický blok byl polyuretan. Mazivo bylo aplikováno při tváření vzorku vz13, a to RENOFORM 319 NAT. Z grafu

na obr. 5.28 je zřejmé, že mazivo nemělo na tváření podstatný vliv. Rozdíly výšek jsou v řádu 1/100 mm.

5.5.1 Ověření výpočtových vztahů

Nyní lze ověřit použité výpočtové vztahy, protože je možné porovnání s konkrétními naměřenými hodnotami. Vypočtené hodnoty budou porovnány s naměřenými u vzorku vz2 ($F_C=1000$ kN, použitý elastický blok ve formě polyuretanu).

Výpočet celkové síly F_C

$$F_C = F_E + F_{tv} + F_f$$

Síla potřebná k přemístění elastomeru a jeho tvarové změně F_E

$$F_E = \beta \frac{1}{3} E_e S_0 \left(\frac{1}{\lambda^2} - \lambda \right) = 2,35 \cdot \frac{1}{3} \cdot 70 \cdot 40000 \cdot \left(\frac{1}{0,972^2} - 0,972 \right) = 189598,3 \text{ N}$$

$$S_0 = ab = 200 \cdot 200 = 40000 \text{ mm}^2$$

$$E_e = 70 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \dots \text{určeno z katalogu [21]}$$

Deformační činitel λ :

$$\lambda = 1 - \frac{\Delta h}{h_0} = 1 - \frac{0,7}{25} = 0,972$$

Δh ...hodnota stlačení bloku polyuretanu byla experimentálně určena (tab. 5.7)

Tab. 5.7 Stlačení polyuretanu.

F_c [kN]	500	1000	1500	2000	2500
Δh [mm]	0,2	0,7	1,1	1,4	1,6

Koeficient tuhosti β :

Hodnota $\beta = 2,35$ určena stejným způsobem jako v kapitole 5.3.1.

Výpočet síly F_E , kde by elastický blok byl ve formě pryže, je obdobný. Je pouze nutné dopočítat modul pružnosti elastomeru E_e , který výrobce neuvádí.

$$E_e = \left\{ \left[\left(\frac{Sh}{10} \right)^{\frac{5,7Sh}{1000}+2} + 10 \right] K_T^{1,62} + 0,82 \left(\frac{Sh}{10} \right)^2 + 10 \right\} \cdot 0,1$$

$$E_e = \left\{ \left[\left(\frac{65}{10} \right)^{\frac{5,7 \cdot 65}{1000}+2} + 10 \right] 2^{1,62} + 0,82 \left(\frac{65}{10} \right)^2 + 10 \right\} \cdot 0,1 = 33,5 \text{ MPa}$$

Výpočet síly pro vlastní tváření F_{tv}

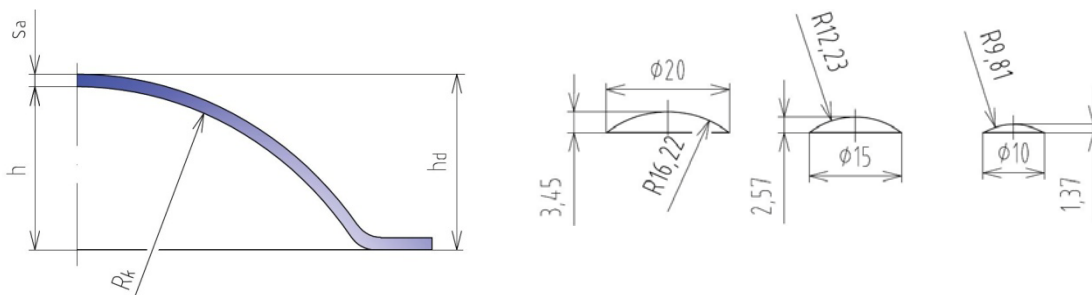
Tlak potřebný pro výrobu jednotlivých prolisů:

$$\sigma_K = R_{p02} = 291 \text{ MPa}$$

$$p_{st\varnothing 20} = \frac{s_0}{\left(R_k - \frac{1}{3} h_d \right)} \cdot \sigma_K = \frac{0,5}{\left(16,22 - \frac{1}{3} \cdot 3,45 \right)} \cdot 291 = 9,7 \text{ MPa}$$

$$p_{stř\phi 15} = \frac{s_0}{\left(R_k - \frac{1}{3}h_d\right)} \cdot \sigma_K = \frac{0,5}{\left(12,23 - \frac{1}{3} \cdot 2,57\right)} \cdot 291 = 12,8 \text{ MPa}$$

$$p_{stř\phi 10} = \frac{s_0}{\left(R_k - \frac{1}{3}h_d\right)} \cdot \sigma_K = \frac{0,5}{\left(9,81 - \frac{1}{3} \cdot 1,37\right)} \cdot 291 = 15,6 \text{ MPa}$$



$$p = \frac{F}{S} \rightarrow F_{tv} = p_{stř\phi 10} \cdot S = 15,6 \cdot (200 \cdot 200) = 624000 \text{ N}$$

Síla potřebná pro překonání třecích odporů F_f

$$F_{f\phi 10} = f p 2\pi R_k h = 0,35 \cdot 15,6 \cdot 2\pi \cdot 9,81 \cdot 0,896 = 301,5 \text{ N} \cdot 16 \text{ prolisů} = 4824,7 \text{ N}$$

$$F_{f\phi 15} = f p 2\pi R_k h = 0,35 \cdot 12,8 \cdot 2\pi \cdot 12,23 \cdot 2,114 = 727,8 \text{ N} \cdot 16 \text{ prolisů} = 11644,2 \text{ N}$$

$$F_{f\phi 20} = f p 2\pi R_k h = 0,35 \cdot 9,7 \cdot 2\pi \cdot 16,22 \cdot 2,999 = 1037,6 \text{ N} \cdot 12 \text{ prolisů} = 12451,7 \text{ N}$$

$f = 0,35 \dots$ pro suché tření, z katalogu [21]

výpočet výšky h pro vzorek vz2:

$$h_{\phi 10} = h_{d\phi 10} - s_{a\phi 10} = 1,37 - 0,474 = 0,896 \text{ mm}$$

$$h_{\phi 15} = h_{d\phi 15} - s_{a\phi 15} = 2,57 - 0,456 = 2,114 \text{ mm}$$

$$h_{\phi 20} = h_{d\phi 20} - s_{a\phi 20} = 3,45 - 0,451 = 2,999 \text{ mm}$$

$$F_f = F_{f\phi 10} + F_{f\phi 15} + F_{f\phi 20} = 4824,7 + 11644,2 + 12451,7 = 28920,6 \text{ N}$$

Celková tvářecí síla F_C

$$F_C = F_E + F_{tv} + F_f = 189598,3 + 624000 + 28920,6 = 842518,9 \text{ N}$$

Vypočtená síla F_C se liší od skutečné síly F_C (tab. 5.8), která byla použita při výrobě vzorku vz2 v experimentu. Odchylka je způsobena zjednodušujícími předpoklady, které byly aplikovány při výpočtu síly F_E . Svoji roli zde hraje i použitý vztah pro výpočet středního tlaku $p_{stř}$ pomocí něhož je vypočtena síla F_{tv} .

Konkrétní postup výpočtu lze aplikovat pouze na prolis ve tvaru kulového vrchlíku.

Tab. 5.8 Hodnoty vypočtené a skutečné síly F_C

Vypočtená síla F_C [N]	842 518,9
Skutečná síla F_C [N]	1 000 000

Ztenčení plechu

Jestliže chceme vytvořit prolis o výšce $h_d=3,45$ mm a poloměru $R_k=16,22$ mm (vzorek vz2), pak maximální ztenčení plechu ve středu prolisu se určí z membránového modelu polotovaru uvedeného na obr. 4.10

$$\varphi_{3Bmax \varnothing 20} = 2 \ln \left(1 - \frac{h_d}{2R_k} \right) = 2 \cdot \ln \left(1 - \frac{3,45}{2 \cdot 16,22} \right) = -0,2249$$

$$\varphi_3 = \ln(1 + \varepsilon) = \ln \left(1 + \frac{s - s_0}{s_0} \right) = \ln \left(1 + (-1) + \frac{s}{s_0} \right) = \ln \left(\frac{s}{s_0} \right)$$

$$\rightarrow e^{\varphi_3} = \frac{s}{s_0} \rightarrow s_{min} = e^{\varphi_{3Bmax}} \cdot s_0 = e^{-0,2249} \cdot 0,5 = 0,40 \text{ mm}$$

Jestliže plocha prolisu je $S = 2\pi R_k h_d$ a bude-li se uvažovat plocha polotovaru, ze kterého bude prolis vyroben $S_0 = 2\pi R_k h_d - \pi h_d^2$, určí se střední hodnota ztenčení plechu následovně:

$$\varphi_{3str} = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \left(1 - \frac{h_d}{2R_k} \right) = \frac{1}{2} \varphi_{3Bmax \varnothing 20} = -0,11245$$

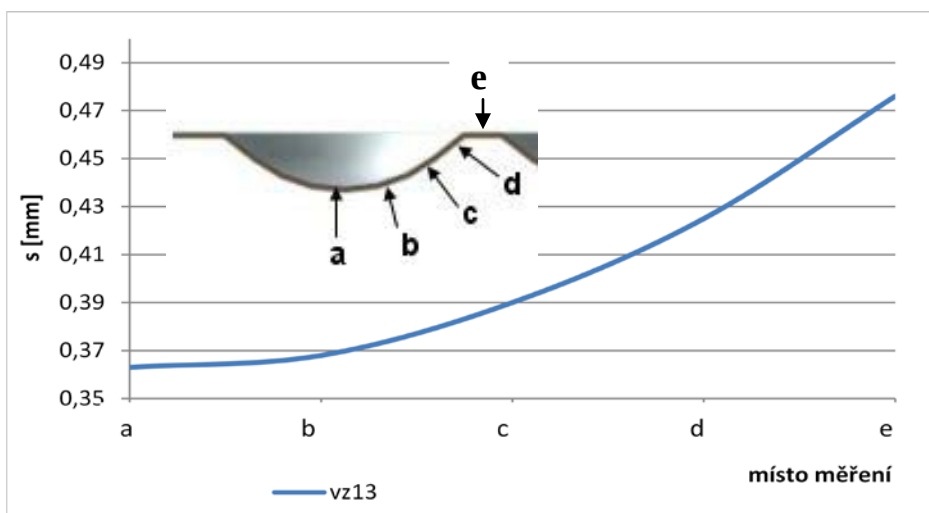
$$s_{str} = e^{\varphi_{3str}} \cdot s_0 = e^{-0,11245} \cdot 0,5 = 0,45 \text{ mm}$$

Hodnota tloušťky plechu ve středu prolisu bude dle výpočtu v intervalu (0,40; 0,45) mm. Změřená minimální tloušťka na vrcholu prolisu $s = 0,451$ mm jen těsně do intervalu nespadá. Důvodem odchylky je zřejmě předpoklad uvažování membránového modelu polotovaru a fakt, že polotovarem byl přístřih jiného rozměru než ve výpočtu uvažovaný. Možná je i nepřesnost měření, jelikož měření na 1/1000 mm je obtížné.

5.6 Zhodnocení

V experimentu bylo dosaženo následujících výsledků:

- Maximální výšky prolisu $h_d = 6,01$ mm bylo dosaženo při $F_C = 3000$ kN a $d_d = 20$ mm, tj. vzorek vz13.
- Minimální tloušťka (obr. 5.01) plechu $s = 0,363$ mm byla naměřena při síle $F_C = 3000$ kN a $d_d = 20$ mm, tj. vzorek vz13.



Obr. 5.01 Tloušťka prolisu v jednotlivých místech

- Výsledky ukázaly, že pro dosažení výšky prolisu $h_d \geq 5$ mm je třeba, aby byl průměr $d_d = 20$ mm a síla $F_C = \min. 2000$ kN. Pro dosažení bohatě strukturovaného povrchu není navržený kuželový tvar prolisů nejvhodnější, neboť pro podmínky tažení elastomerem by bylo vhodnější vytvořit matici ve formě tažníku a ne tažnice, jak bylo z výrobních důvodů třeba. Pro snadné vytvoření tažníku bude pak vhodnější změnit tvar struktury prolisů na jehlanovitý.
- Z výše naměřených hodnot a následných grafů je patrné, že při použití pryže jako elastického bloku dochází k většímu ztenčení plechu a dosahuje se větších výšek prolisů než s využitím polyuretanu při stejné síle F_C . Tento jev může být dán nižší hodnotou modulu pružnosti elastomeru (pryže) E_e , a tím i nižší hodnotou síly potřebné k přemístění elastomeru (pryže) F_E . Využití pryže je ovšem limitováno velikostí síly F_C . Pro sílu vyšší jak 2000 kN ji již nebylo možné použít, protože byla zatlačována i do vůlí v nástroji, což vedlo k obtížnému vyjmutí přístřihu.

5.7 Návrh postupu výroby pro průmyslové využití [20],[25],[27],[28],[30]

Výrobu je možno realizovat pevným i nepevným nástrojem. Při využití pevného nástroje (pevný tažník i tažnice) se znatelně prodraží jeho výroba, proto je vhodné zjistit, kdy se stává řešení rentabilní. Je patrné, že pro malosériovou výrobu je nabízená možnost výroby nevhodná. Větší uplatnění se nabízí ve velkosériové výrobě. Řešení pevného nástroje není však předmětem této práce, a proto nebude blíže rozebíráno. Při využití nepevného nástroje je možné vycházet ze získaných hodnot a poznatků v experimentální části práce.

Na základě provedeného experimentu je patrné, že kuželové prolisy se vyskytují zejména tam, kde probíhalo tažení se vstupním průměrem $d_d = 20$ mm kuželového otvoru na tažnici. Použitá síla F_C přitom byla v rozmezí (2000 až 3000) kN, což odpovídá tlaku $p = (50 \text{ až } 75)$ MPa.

Solární kolektory jsou nejčastěji vyráběny tak, že jejich absorpční plocha (plocha, na kterou dopadá sluneční záření) se pohybuje kolem 2 m^2 . To znamená, že pro výrobu prolisů na takovéto ploše by bylo nutné zajistit celkovou tvářecí sílu F_C o velikosti:

$$F_C = p \cdot S = (50 \text{ až } 75) \cdot 2000000 = 100 \text{ až } 150 \text{ MN}$$

Takto vysoké síly F_C (potažmo tlaky) v kombinaci s nutným velkým pracovním prostorem lisu např. 1000×2000 mm poskytuje řešení od firem ACB a Cyril Bath. Lisy jsou navrženy pro modernizovanou metodu Guerin.



Lisy umožňují tlaky až do $1000 \text{ bar} = 100 \text{ MPa}$, při maximálním rozměru elastického bloku 2200×1000 mm. Základní parametry lisů jsou uvedeny v tab. 5.9.

Obr. 5.29 Ilustrativní obrázek lisu od firmy ACB [25]

Tab. 5.9 Přehled vybraných lisů [35]

Označení	EMC 3500	EMC 5000	EMC 8000	EMC 12500	EMC 16000	EMC 20000
Tvářecí síla [kN]	35000	50000	80000	125000	160000	200000
Rozměr elastického bloku [mm]	840x610	1000x650	1200x750	1600x900	1900x950	2200x1000
Max. výška matrice [mm]	120	120	120	180	200	200

Další možností je nezpracovávat tak velké tabule plechu najednou, ale nařezat je na díly menších rozměrů, které by se po vyrobení prolisu svařily. Otázkou ovšem je, zda by toto řešení neovlivnilo funkčnost kolektoru/absorbéru z hlediska účinnosti. Do takto nařezaných přístřihů je možné vytvořit prolisy více způsoby:

- Metodou Guerin (zmíněno výše),
- Metodou Verson – Wheelon,
- Metodou Hydroforming.

Metoda Verson – Wheelon

Pod gumovou desku na pracovním stole se vloží přístřih (obr. 5.30), který bude umístěn na tažnici. Hydraulicky ovládaný stůl, který má většinou dvě části (jedna vždy v pracovním prostoru lisu a druhá vně), zajíždí do lisu a nastává tvarování plechu.



VERSION WHEELON 10800R

Rozměry stolu: 26" x 104" (přibližně 660x2640 mm)

Tvářecí síla: 10800 tun

Obr. 5.30 Lis Verson – Wheelon [30]

Metoda Hydroforming

V daném případě jde o variaci metody Hydroforming, popsanou v kapitole 3.4. Vysoký tlak kapaliny působí na přístřih plechu, který je donucen kopírovat tvar tažnice. Na obr. 5.31-36 je řešení firmy Fluidforming. Přístřih plechu je uložen na tažnici, která je umístěna na posuvném stole. Po zajetí stolu do pracovního prostoru lisu dochází k samotnému tváření.

Na obr. 5.33 je vidět, že kapalina potřebná k vytvarování plechu zůstává po tváření ve vzniklé dutině.



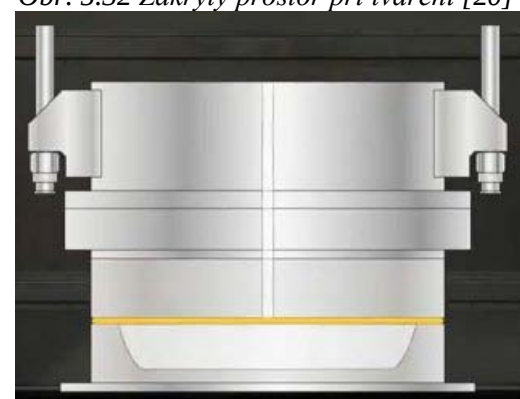
Obr. 5.31 Uložení přístřihu [20]



Obr. 5.32 Zakrytý prostor při tváření [20]



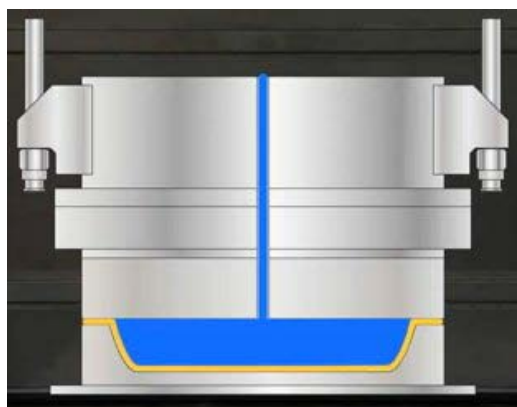
Obr. 5.33 Kapalina v dutině [20]



Obr. 5.34 Schéma procesu před tvářením [20]

Stroj: FormBalancer FB35

Rozměry stolu: 1000 x 1200 mm. Tvářecí tlaky: max. 4000 bar (=400 MPa)



Obr. 5.35 Schéma procesu po tváření [20]



Obr. 5.36 Hotový dílec [20]

5.7.1 Výroba pomocí nepevného nástroje v České republice [27], [28]

Výroby pomocí nepevného nástroje je zejména využíváno v leteckém průmyslu. Například ve firmě LETOV LETECKÁ VÝROBA je využívána metoda tváření pomocí pryže již několik desetiletí. V roce 2006 firma zakoupila lis EMC 4200T (obr. 5.37) o maximální lisovací síle 4200 tun a pracovním prostorem o velikosti 2000x1000 mm. Výška nástroje (matrice) je omezena na 90 mm. Lis je využíván především ke tváření hliníkových slitin. Pro vyšší tlaky je stroj vybaven oválnou vysokotlakou vložkou, která umožňuje tváření silnějších plechů.

*Obr. 5.37 Lis EMC 4200T [27]**Obr. 5.38 Lis LH 1000 [28]*

V českém leteckém průmyslu byly do té doby užívány lisy s lisovací silou přibližně 1000 tun a pracovním prostorem o velikosti max. 1000x1000 mm. Tyto lisy byly provozovány v podnicích Aero Vodochody, Orličan Choceň, Letov Praha a Let Kunovice. V Aeru Vodochody a Orličanu Choceň byly tyto lisy zrušeny v polovině 80. let.

Firma EVEKTOR AREOTECHNIK pro změnu využívá lis LH 1000 (obr. 5.38) o maximální lisovací síle 10 MN, pracovní plocha je 1200x700 mm, maximální tlak dosažitelný elastickým blokem je 20 MPa.

ZÁVĚR

Experiment byl proveden na hydraulickém lisu CZR600. Vzhledem k pracovnímu prostoru lisu byly pro experiment použity přístřihy nerezového plechu 17 240 o rozměrech 0,5x200x200 mm.

Z posuzovaných vlivů na tažení (vydouvání) prolisů měl největší význam použitý elastický blok (pryž/polyuretan), přičemž pryží bylo dosaženo větších výšek h_d i ztenčení prolisu. Použití však bylo limitováno silou $F_C=2000$ kN, kdy docházelo k zatékání pryže do vůlí v nástroji a následnému obtížnému vyjmutí přístřihu. Mazání a odvzdušnění mělo minimální význam na průběh experimentu.

Optimálního kuželového prolisu ($h_d \geq 5$ mm) se dosáhne při $d_d=20$ mm a síle $F_C= (2000 \text{ až } 3000)$ kN za použití elastického bloku v podobě polyuretanu. Pro případné ověření funkčnosti absorbéru se na základě experimentu doporučuje vytvořit strukturovaný povrch ve formě kuželových prolisů, kde $d_d=20$ mm, osová vzdálenost mezi jednotlivými prolisy je 23 mm a síla $F_C= (2000 \text{ až } 3000)$ kN v závislosti na výšce h_d . V případě pozitivních výsledků a rozhodnutí se pro větší objem výroby se dále doporučuje kooperace s firmami, jenž se zabývají leteckou výrobou (např. LETOV LETECKÁ VÝROBA) vzhledem k vhodnému strojnímu vybavení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DVOŘÁK, Milan. *Technologie tváření: plošné a objemové tvaření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007, 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
2. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Brno: CERM, 2001, 238 s. ISBN 80-214-2032-4.
3. ERSHOV, V, V. GLAZKOV a M. KASHIRIN. *Sovershenstvovanie formoizmenīāūshchikh operatīv listovoi shtampovki*. Moskva: "Mashinostroenie", 1990. ISBN 52-170-0856-3.
4. FOREJT, Milan. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
5. KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 1993, 349 s. ISBN 80-010-1003-1.
6. *Kovárenství*. Brno: Svaz kováren České republiky, 2008. ISSN 1213-9289.
7. LADENER, Heinz. *Solární zařízení*. 1. vyd. Praha: Grada, 2003, 267 s. ISBN 80-247-0362-9.
8. MARCINIAK, Zdzislaw. *Teorie tváření plechů*. Vševald Jandura. Praha: SNTL, 1964, 259 s. DT 621.777.001.
9. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1992, 186 s. ISBN 80-214-0401-9.
10. SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010, 134 s. ISBN 978-80-214-4220-7.
11. SVOBODA, Pavel. *Výběr z norem pro konstrukční cvičení*. 1. vyd. Brno: CERM, 2006, 223 s. ISBN 80-720-4465-6.
12. ŠMEHLÍKOVÁ, Eva. *Příspěvek k radiálnímu vypínání osově symetrických dílců: Contribution to radial expanding of axially symmetrical components*. Brno: VUT FSI, 2007. 116 s. ISBN 978-80-214-3677-0. Dizertační práce.
13. ŠPAČEK, Jindřich. *Speciální technologie I a II: návody do cvičení - část: plošné tváření*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1991, 109 s. ISBN 80-214-0259-8.
14. TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE. *Hluboké tažení plechu na lisech*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 196 s. Knihnice techn. aktualit. ISBN 80-030-0221-4.
15. ZAHÁLKA, Vratislav. *Zhodnocení tažení elastickým a kapalinovým polštářem a možnosti zvyšování účinnosti tažení hydromechanickým způsobem*. Brno: VUT FSI, 1976. 275 s. Dizertační práce.

16. About the Hydroforming Process. *JMP Forming* [online]. ©2011 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.jmpforming.com/hydroforming/about-hydroforming-process.htm>
17. *Industrial parts - Photo Gallery - Our expertise - Phoenix 3D Metaal* [online]. ©2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.phoenixmetaal.nl/en/our-expertise/photo-gallery/industrial-parts.html>
18. LASCOE, O.D. *Handbook of fabrication processes* [online]. 5. printing. Metal Park, Ohio: ASM International, 1988 [cit. 2012-04-21]. ISBN 08-717-0302-5. Dostupné z: http://books.google.cz/books/about/Handbook_of_Fabrication_Processes.html?hl=cs&id=4PZxakNhjT0C
19. PETRUŽELKA, J. *NEKONVENČNÍ METODY TVÁŘENÍ* [online]. 25. 5. 2007 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Nekonvencni%20metody%20tvareni%202007.pdf>
20. Hydroforming machines Formbalancer FB25 and FB35. *FF Fluidforming GmbH* [online]. ©2010 [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://www.fluidforming.de/index.php/en/hydroformmaschine-formbalancer>
21. FIBROFLEX® and FIBROELAST®-sheets and profiles. *FIBRO GmbH* [online]. ©2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://www.fibro.com/xdesk_neu/ximages/265/2196_teilg.pdf
22. FOREJT, M. *EXPERIMENTÁLNÍ METODY* [online]. 2003 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/experimentalni_metody_cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf
23. OBRÁBĚCÍ OLEJE A PASTY – PŘEHLED SORTIMENTU. *LPW* [online]. ©2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.lpw.cz/doc/OLEJE%20A%20PASTY.pdf>
24. Slunce - obrovský zdroj energie. *REVOLT s.r.o. - revitalizace : zateplení : solární systémy* [online]. ©2003-2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.fachmani.cz/solarni-systemy/slunce-jako-obrovsky-zdroj-energie>
25. Solutions for Sheet Metal Parts. *FormTech GmbH* [online]. 6. března 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.formtech.de/download/FormTech%20Company%20Presentation.pdf>
26. Technologie plošného tváření - tažení. *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. 26. listopadu 2008 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm

27. Tváření plechů. *LETOV* [online]. 26. dubna 2012 [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://www.llv.cz/cz/tvareni-plechu.html>
28. Tváření plechů. *Evektor-Aerotechnik - výroba letadlových celků, přípravků, obrábění* [online]. 26. dubna 2012 [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://www.evektoraircraft.com/cs/vyrobní-možnosti/tvareni-plechu>
29. *ÚVOD DO TVÁŘENÍ II* [online]. Ostrava, 2001 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: http://www.345.vsb.cz/jiripetruselka/Texty/Uvod_TV2.pdf
30. *VERSION WHEELON10800R* [online]. 26.07.2010 [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://www.youtube.com/watch?v=t22DZWp5-zg>
31. KAISER, Viktor. Nové možnosti využití postupových nástrojů pro plošné tváření plechů. In: *STČ - Konference Studentské tvůrčí činnosti* [online]. [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/History/2007/Sbornik/S2/Kaiser_Viktor_12123.pdf
32. Vlastnosti a použití nerezových austenitických ocelí. *TERAPOL nerezové oceli* [online]. ©2002 [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://www.terapol.cz/vlastnostiapouziti.php>
33. ČSN 41 7240. *Korozivzdorná austenitická ocel*. 1973.
34. ČSN 41 1373. *Nelegovaná ocel obvyklých vlastností vhodná ke svařování pro ocelové konstrukce*. 1994.
35. *Firemní materiál firmy ACB*.
36. LIDMILA, Z. *Zápisky z přednášek předmětu Speciální technologie tváření*. 2011.
37. DVOŘÁK, M. *Zápisky z přednášek předmětu Speciální technologie tváření*. 2011.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
B	[°Sh]	Počet stupňů na stupnici Shore
b _o	[mm]	Počáteční šířka vzorku
d _d	[mm]	Vstupní průměr kuželového otvoru
D _L	[mm]	Průměr lisovníku
E _e	[MPa]	Modul pružnosti elastomeru
F _C	[N]	Celková tvářecí síla
(F _C) _E	[N]	Průběh síly při tažení elastomerovým nástrojem
(F _C) _K	[N]	Průběh síly při tažení konvenčním nástrojem
F _E	[N]	Síla potřebná k přemístění elastomeru a jeho tvarové změně
F _f	[N]	Síla potřebná k překonání třecích odporů
F _m	[N]	Maximální síla před porušením zkušebního vzorku
F _{tv}	[N]	Síla potřebná pro vlastní tváření
f	[-]	Součinitel tření
H	[mm]	Výška tažníku
h	[mm]	Výška lemu
h _d	[mm]	Výška prolisu
h _o	[mm]	Původní výška elastomerového bloku
Δh	[mm]	Stlačení elastomerového bloku
Δh _L	[mm]	Hloubka vnoření lisovníku
K	[-]	Stupeň tažení
K _T	[-]	Tvarový součinitel
L _o	[mm]	Počáteční délka vzorku
p	[MPa]	Měrný tlak
p _p	[MPa]	Průběh tlaku na pouzdru
p _{pe}	[MPa]	Průběh tlaku na pevném lisovníku
p _{po}	[MPa]	Průběh tlaku na pohyblivém lisovníku
R _{1,2,k}	[mm]	Poloměry zakřivení výlisku
R _b	[mm]	Poloměr křivosti stěny
R _{p02}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R _t	[mm]	Poloměr tažné hrany
r _{kr}	[mm]	Kritický poloměr
S _o	[mm ²]	Plocha polotovaru
s _o	[mm]	Původní tloušťka plechu
S	[mm ²]	Plocha výtažku
s	[mm]	Okamžitá tloušťka plechu
S _{e..}	[mm ²]	Plocha elastomer. dílce,
S _v	[mm ²]	Průmětová volná plocha elastomeru
S _L	[mm ²]	Průmětová plocha lisovníku
V	[mm ³]	Celkový objem elastomerového bloku
v _f	[mm.s ⁻¹]	Kluzná rychlost
V _e	[mm ³]	Objem elastomeru přemísťovaný do volné plochy

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
β	[-]	Koeficient tuhosti
ε	[-]	Poměrná deformace
ρ	[kg.mm ⁻³]	Hustota
λ	[-]	Deformační činitel
φ_1	[-]	Logaritmická deformace obvodová
$\varphi_{2,m}$	[-]	Logaritmická deformace meridiální
$\varphi_{3,n}$	[-]	Logaritmická deformace ve směru tloušťky
$\varphi_{m \max}$	[-]	Maximální dosažitelná meridiální deformace
$\varphi_{mst \dot{\gamma}}$	[-]	Střední hodnota přírůstku meridiální deformace
$\sigma_{2,m}$	[MPa]	Meridiální napětí
$\sigma_{1,\varphi}$	[MPa]	Obvodové napětí
σ_K	[MPa]	Mez kluzu
ν	[Pa.s]	Koeficient dynamické viskozity

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Hydraulický lis CZR 600
Příloha 2 Hydraulický zkušební stroj ZD 40
Příloha 3 Výkres sestavy: Nástroj (3-50/60-11/00)
Příloha 4 Výkres sestavy: Kontejner (3-50/60-11/05)
Příloha 5 Výkres součástí: Matrice (3-50/60-11/08)

Příloha 1

Název stroje:

Lis hydraulický vtlačovací (razicí).

Typ: **CZR 600**

Výrobce: TOS Rakovník

Popis:

- lisovací síla 6000 kN,
- zdvih Z 125mm,
- průchod B 300mm,
- max. otevření lisu H 300mm,
- průměr upínací desky:
 - - spodní 345mm,
 - - horní 350mm,
- výkon elektromotoru čerpadla 0,74kW,
- rozměry lisu (dxšxv) 1600x800x1980mm,
- hmotnost lisu s čerpadlem 2400kg.
- Je určen zejména pro výrobu dutin ve formách a v zápustkách vtlačováním tvarového lisovníku do ocelových polotovarů za studena.



Příloha 2

Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

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

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

Technické parametry:

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

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



Řídicí jednotka EDC 60