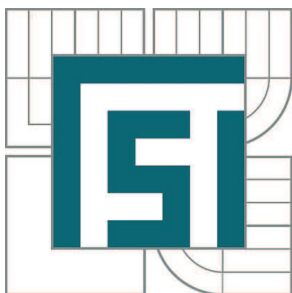


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SPECIFIKA TVÁŘENÍ ELASTOMERY

SPECIFICS OF FORMING USING ELASTOMERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VÍT BARÁK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vít Barák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Specifika tváření elastomery

v anglickém jazyce:

Specifics of forming using elastomers

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování literární studie technologických problémů vznikajících při tváření elastomery. Součástí práce bude základní rozdělení a odlišnosti oproti konvenčním technologiím a kapalině.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na technologické problémy tváření kovů elastomery se zhodnocením jejich vhodnosti či nevhodnosti a s ukázkami použití.

Seznam odborné literatury:

1. Fibro. Elastomere - Desky a profily FIBROFLEX® [online]. © 2004-2007. [cit. 2006-08-15]. Dostupný z WWW: <http://www.fibro.de/xdesk_neu/ximages/265/1217_teilg.pdf>. [Http://www.gore.cz/index.php?view=article&catid=43%3Akatalogy-fibro-ke-staeni&id=87%3A12-elastomery&option=com_content&Itemid=70](http://www.gore.cz/index.php?view=article&catid=43%3Akatalogy-fibro-ke-staeni&id=87%3A12-elastomery&option=com_content&Itemid=70).
2. LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření. Brno: RVO VA, 1994. 214 s.
3. SAMEK, Radko. Technologické problémy při tváření elastomery. In Sborník VA v Brně. 1. vyd. Brno: VA, [1990]. s. 79-85.
4. SAMEK, Radko. Využití polytanu ke tvarování dílců leteckých motorů. [s.l.]: [s.n.]. s. 231-272.
5. ŽÁK, Jan, SAMEK, Radko, BUMBÁLEK, Bohumil. Speciální letecké technologie I. 1. vyd. Ediční středisko VUT Brno. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. ISBN 80-214-0128-1. s. 220.
6. HOLUB, Josef. Pryž jako konstrukční materiál. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1965. 268 s. Redakce chemické literatury. DT 678.4:621.
7. NOVOTNÝ, K. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno, Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1992. 186 s. Edit. Nakladatelství VUT v Brně. ISBN 80-214-0401-9.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 20.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

BARÁK Vít: Specifika tváření elastomery

Práce obsahuje přehled metod tváření využívajících elastomerový nástroj včetně rozdělení jednotlivých nástrojů a vhodnosti k daným operacím. Tváření elastomery se řadí mezi nekonvenční metody tváření pomocí pružného nástroje, které je vhodné zejména pro tváření plechů. Jako materiál se používá pryž a polyuretan. Jsou zde také uvedeny vlastnosti, tvářecí síly a další zajímavosti elastomerů. Princip spočívá v nahrazení pevné části nástroje pružným médiem. Metody tváření jsou rozděleny podle konstrukce nástroje, na tváření otevřeným nástrojem a tváření uzavřeným nástrojem. Tváření otevřeným nástrojem zahrnuje ohýbání a zakružování. Mezi tváření uzavřeným nástrojem patří metody Guerin, Marform, Maslenikov, radiální vypínání a protlačování. Dále jsou uvedeny ukázky nástrojů a odlišnosti oproti konvenčním metodám a kapalinám. Výhodou elastomerového nástroje je nízká cena, jednoduchost a šetrnost k povrchově upraveným výrobkům. Nevýhodou je nízká životnost, nízká produktivita a použití velkých tvářecích sil. Tváření elastomery má uplatnění v kusové a malosériové výrobě.

Klíčová slova: elastomery, nekonvenční metody, pryž, polyuretan

ABSTRACT

BARÁK Vít: Specifics of forming using elastomers

The thesis contains a review of methods using elastomer tool, including the distribution of tools and suitability to the operations. Forming using elastomers is among the unconventional forming methods using flexible tool which is especially suitable for sheet metal forming. The material is used rubber and polyurethane. There are described properties, forming forces and other attractions of elastomers. The principle consists in replacing the fixed part of the tool flexible medium. Forming methods are divided to open tool forming and close tool forming, according to the construction of forming tool. Open tool forming includes bending and roll bending. Among the close tool forming methods is Guerin, Marform, Maslenikov, radial expanding and extrusion. The following are examples of tools and differences compared to conventional methods and liquids. The advantage of elastomeric tool is a low cost, simplicity and frugality to surface modified products. The disadvantage is a low life, low productivity and the use of large forming forces. Forming using elastomers has application in the prototypes and small series production.

Key words: elastomers, unconventional methods, rubber, polyurethane

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARÁK, Vít. *Specifika tváření elastomery*. Brno, 2013. 33 s., CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24.5.2013

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD	9
1 TVÁŘENÍ ELASTOMERY	10
2 VLASTNOSTI ELASTOMERŮ	11
2.1 Modul pružnosti a spěchovatelnost	13
2.2 Tvářecí síla.....	14
2.3 Rozložení tlaku	15
2.4 Mullinsův efekt.....	16
3 METODY TVÁŘENÍ ELASTOMERY	17
3.1 Tváření otevřeným nástrojem	17
3.1.1 Ohýbání.....	19
3.1.1 Zakružování	20
3.2 Tváření uzavřeným nástrojem	21
3.2.1 Metoda Guerin	22
3.2.2 Metoda Marform.....	25
3.2.3 Metoda Maslenikov	27
3.2.4 Radiální vypínání.....	29
3.2.5 Protlačování trubek	31
3.3 Další využití elastomeru	31
4 ZÁVĚR.....	33

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek

ÚVOD [7,8,10,16,18]

Z důvodu vysoké efektivity a minimálního množství odpadu, se více jak 90% výrobků zhotovuje některou z technologií tváření. Všeobecnou snahou je, aby rostl podíl beztržkových technologií. Trendem dnešní doby je tedy maximální zefektivnění výroby, zvyšování produktivity a snižování nákladů. Provádí se neustálý vývoj a výzkum technologií, a tím i zdokonalování složitých konstrukcí nástrojů a zařízení.

Technologie tváření je obecně hojně využívána zejména v hutní a strojírenské výrobě. Jedná se o proces, při kterém se účelným vyvoláním plastických deformací v materiálu získá požadovaný tvar. Důležitá vlastnost tvářeného materiálu je tvařitelnost, což je schopnost materiálu nechat se plasticky deformovat. Výhodou technologie tváření je využití materiálu, vysoká produktivita a rozměrová přesnost. Nevýhodou jsou obecně vysoké pořizovací náklady strojů a nástrojů, a také omezenost rozměrů výrobků. Podle použité metody a typu nástroje lze tváření dělit na konvenční a nekonvenční.

Konvenční tváření je běžné a nejpoužívanější tváření používané v sériové výrobě. Tvářecí nástroj je pevný (nejčastěji ocelový), takže se nemění se jeho tvar. Vedle zaběhnutých (konvenčních) metod, kde je materiál tvářen pevnými nástroji, existují také nekonvenční metody tváření, kdy je některá část zařízení nahrazena nepevným nástrojem (kapalinou, elastomerem). Tyto metody mají využití v plošném tváření.

Nekonvenční tváření je méně častá metoda s charakteristickým rysem, kterým se liší od konvenčních metod. Mezi nekonvenční metody tváření patří metody, jako jsou tváření vysokými parametry (tváření výbuchem, elektrohydraulické tváření, elektromagnetické tváření), tváření ultrazvukem, speciální technologie pro letecký a kosmický průmysl a také tváření nepevným nástrojem (elastomerem).

Na obr. 1 je ukázka součástek, které se vyrábějí tvářením pomocí elastomerů. Tvary elastomerů jsou na obr. 2.



Obr. 1 Ukázka výrobků vyrobených tvářením elastomery [10]



Obr. 2 Ukázka elastomerů [10]

1 TVÁŘENÍ ELASTOMERY [7,10,16,17,24]

Tváření pomocí elastomeru má své počátky v druhé polovině 19. století. Důvodem bylo odstranění poškrábání plechů během tváření, které vznikalo třením kovového obrobku o kovový nástroj. Zájem o využití pružných nástrojů vzrostl v 60. letech minulého století, se zavedením polyuretanu s velkým rozsahem tvrdostí. Část tvářecího nástroje je zde nahrazena nepevným nástrojem - elastomerem (pryž, polyuretan), který je nejčastěji ve tvaru plného nebo dutého válečku (obr. 1) nebo hranolu (obr. 2). Nahrazuje se většinou drahá lisovnice, čímž dojde ke snížení ekonomických nákladů na její výrobu. Tento způsob se používá převážně k plošnému tváření, jelikož by pružná média nebyla schopna přetvořit objemnější materiál. Elastomer lze tedy použít pro ohýbání, tažení, stříhání a radiální vypínání tenkostěnných plechů.



Obr. 1.1 Elastomer ve tvaru válečků [10]

Důležité vlastnosti elastomeru jsou jeho univerzálnost, jednoduchost výroby a nízká cena. Naopak problémem je především živostnost, nízký teplotní rozsah a nutnost použití těžkotonážních strojů, které musí být dostatečně výkonné, aby přetvarovaly polotovary včetně elastomeru. Elastomer, jako materiál, má také deformační chování vhodné k využití v technologii tváření. Jeho chování je ovlivňováno mechanickými vlastnostmi (tvrdost, pevnost, modul pružnosti, smykový modul, tažnost, kontrakce), ale také dalšími vlivy, jako je například velikost.

Díky tomuto materiálu se otevřely nové možnosti výroby a kvality povrchu součástek ve strojírenství, především pak v kusové výrobě, malosériové výrobě a výrobě prototypů. Metody tváření elastomery jsou hojně využívány v automobilovém a leteckém průmyslu.

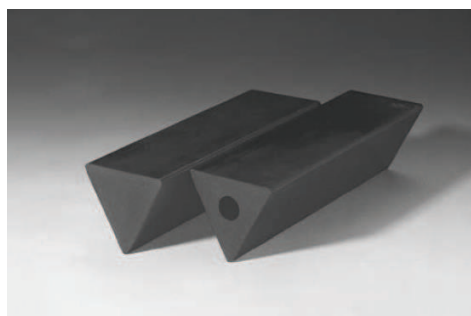
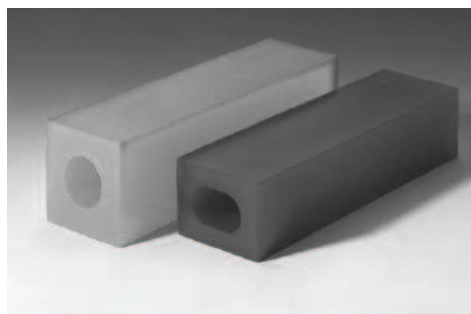
Shrnutí výhod a nevýhod tváření pomocí elastomeru oproti konvenčním metodám, je popsáno níže.

Výhody:

- levný nástroj
- univerzálnost
- jednoduchá konstrukce
- rozložení sil na obrobek
- kvalita povrchu obrobku

Nevýhody:

- nízká životnost nástroje
- nízká produktivita
- velké tvářecí síly
- jen pro tenké plechy

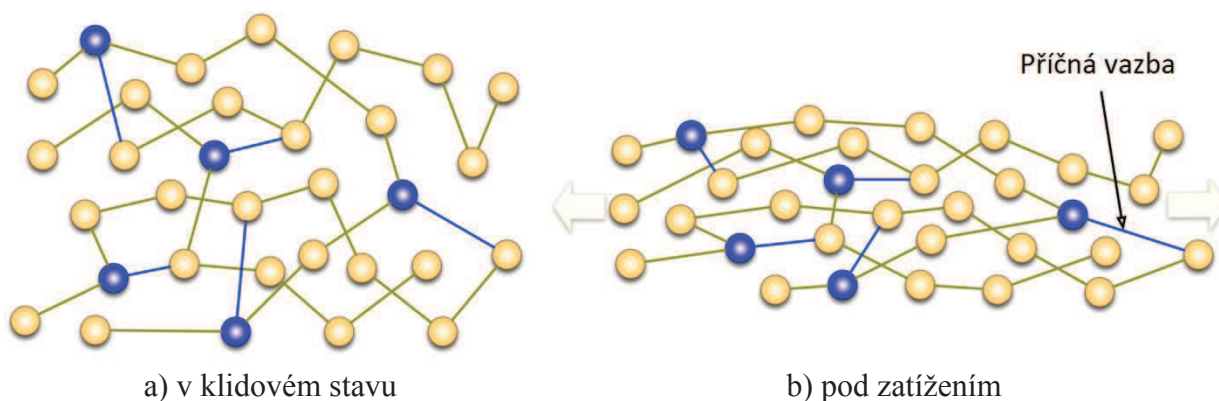


Obr. 1.2 Elastomer ve tvaru hranolů [10]

2 VLASTNOSTI ELASTOMERŮ [1,6,9,11,19,27]

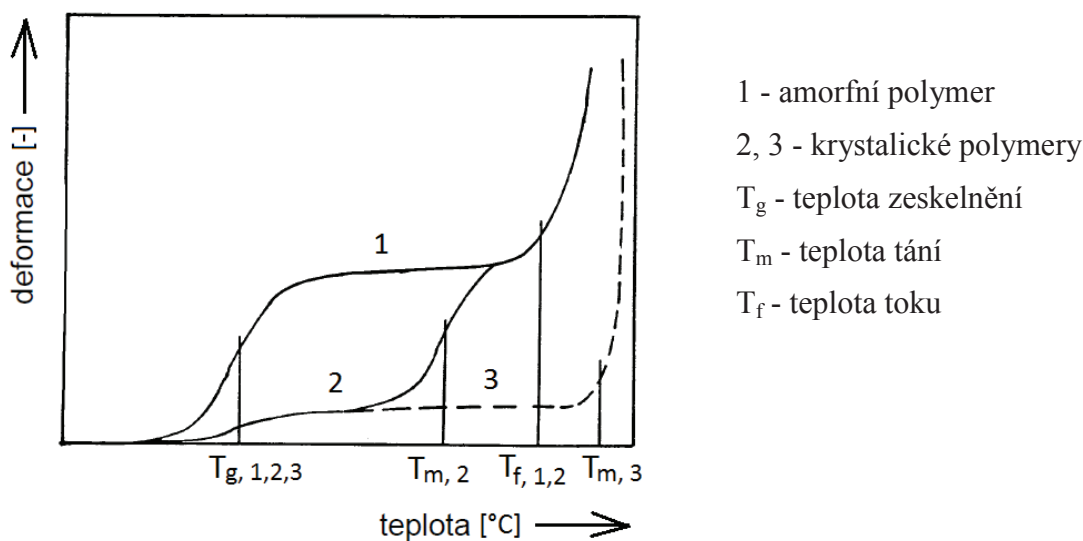
Elastomery patří do skupiny polymerů. Jsou to syntetické materiály, které mají velký význam nejen ve strojírenském průmyslu, ale také ve stavebnictví, lékařství, elektroprůmyslu a potravinářském průmyslu. Ve strojírenství mají význam díky svým specifickým vlastnostem, které ostatní kovové a nekovové materiály nemají.

Stavba elastomeru je tvořena makromolekulárními chemickými látkami, jejichž makromolekuly jsou vzájemně spojeny chemickými vazbami tak, že vytvářejí lineární, rozvětvený nebo sesíťovaný polymer. Pod pojmem sesíťované polymery se rozumí řetězce, jejichž makromolekuly jsou vzájemně spojené do trojrozměrné prostorové sítě. Vznikají buď sesíťováním lineárního nebo rozvětveného polymeru za vzniku příčných vazeb (obr. 2.1) neboli vulkanizací. Čím více příčných vazeb se zavede, tím větší je hustota sítě, a tím větší je modul pružnosti.



Obr. 2.1 Stavba elastomeru [27]

Polymery se dělí podle uspořádání krystalické mřížky na krystalické a amorfní. Amorfní polymery mohou existovat ve třech fázových stavech (sklovitý, kaučukovitý, plastický). V jakém stavu se bude polymer za normální teploty nacházet a rozsah teplot v tomto stavu, určuje chemické složení a molekulová hmotnost látky. Závislost deformace na teplotě polymeru znázorňuje diagram na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Termomechanická křivka polymeru [6]

V technologii tváření se používají dva druhy polymerů - pryž a polyuretan.

Pryž je vyrobena z kaučuku procesem zvaným vulkanizace, což je fyzikálně chemický pochod, při němž se kaučuk, který je převážně plastický, mění v pryž s charakterem převážně elastickým. Kromě tvářecího média se lze s pryží setkat u nejrůznějších běžných produktů. Jsou z ní vyrobeny například gumy, těsnění, pneumatiky nebo boty. Vyznačuje se velkou elasticitou, odolností vůči opakovaným deformacím, chemickou odolností a elektroizolačními vlastnostmi. Výhodou je také poměrně velký rozsah pracovních teplot a to -40 až 100°C . Lze ji použít i ke krátkodobému tváření za teplot 200 až 300°C , přičemž vliv teploty na vlastnosti pryže je značný. Např. při teplotách pod -40°C se svými vlastnostmi blíží kovům, ale při teplotách kolem 100°C se vlastnosti v porovnání s provozní teplotou 20° silně zhoršují. Všechny statické i dynamické vlastnosti pryže jsou ovlivňovány tvarem a rozměry zkušební tělesa, rychlostí změny velikosti vnějších sil a teplotou. Maximální měrný tlak je do 50 MPa . Tvrdosti se pohybují od 10 ShA do 80 ShA .

Polyuretan se vyrábí polyadící diizokyanátů a dvoj nebo vícesytných alkoholů za vzniku uretanové vazby. Polyadice je reakce, při které reagují dva různé monomery s vhodnými vlastnostmi a dochází ke vzniku vysokomolekulárního produktu bez tvorby nízkomolekulární sloučeniny. Vyrábí se ve formě pěnové, elastické a pevné. V technologii tváření se využívá pevná forma. Při zpracování je v kapalném stavu a lze jej tedy vytvarovat do požadovaného tvaru tvářecího média. Ve formě tvářecího média je v tuhém stavu. Polyuretan má využití také jako pružiny ve tvaru elastomerového bloku, který je méně nákladný a zabírá méně místa než běžná vinutá pružina. Dále se používá například na výrobu izolací ve stavebnictví, ale má také uplatnění u výrobků, kde se kombinuje polyuretan a kov (obr. 2.3), jelikož jej lze snadno s kovem spojovat. Vyznačuje se dobrou tvrdostí, elasticitou, ořezuvzdorností, stálostí (v benzínech, minerálních olejích, ropných produktech a ozonu), odolností vůči opotřebení, odolností vůči stárnutí a životností, která je mnohonásobně vyšší než u pryží. Ovšem oproti pryžím lze pracovat v provozních teplotách jen -50 až $+70^{\circ}\text{C}$. Pracovní tlaky jsou běžně nad 100 MPa a krátkodobě lze dosáhnout až 1000 MPa . Polyuretanový blok je možno odlehčit, a tím dojde k lepšímu přemístění a snížení deformační síly k přetvoření elastomeru. Litím a třískovým obráběním do požadovaného tvaru jde také dobře spojovat s dalšími materiály. Rozsah tvrdostí polyuretanu je poměrně velký (48 ShA až 98 ShA), čímž jej lze využít v mnoha technologických operacích. Nevýhodou je vyšší cena oproti pryžím.



Obr. 2.3 Výrobky zhotovené kombinací polyuretanu a kovu [1,9]

2.1 Modul pružnosti a spěchovatelnost [18,22]

První uváděnou vlastností je spěchovatelnost, která představuje procento původního objemu, který může být stlačen. Je závislá na rozměrech a typu elastomeru.

Důležité kritérium při konstrukci tvářecích zařízení tvoří zabíhavost. Pohyblivé části stroje musí mít dostatečně malé vůle, aby nedocházelo k zatékání elastomeru, a tím i zadírání stroje. Vhodná vůle mezi polyuretanem a lisovníkem by měla být menší než 0,15 mm.

Dalším důležitým faktorem ve výpočtech je tvarový součinitel, který udává poměr zatížené plochy a volné plochy elastomeru.

$$K_T = \frac{\text{plocha}_{\text{zatížená}}}{\text{plocha}_{\text{nezatížená}}} [-] \quad (2.1)$$

Tvarový součinitel, společně s teplotou, tvrdostí a frekvencí zatěžování, ovlivňuje modul pružnosti a modul plasticity.

Modul pružnosti elastomeru se určuje, stejně jako u oceli, z tahového diagramu. Velkým problémem při určování je, že jeho průběh je závislý nejen na tvarovém součiniteli, ale také na tvrdosti elastomeru. Určí se poměrem napětí a deformace za smluvních podmínek.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot h_0}{S_p \cdot \Delta h} [MPa], \quad (2.2)$$

kde σ je napětí materiálu [MPa]

ε je poměrná deformace [-]

F je zatěžující síla [N]

S_p je velikost průřezu [mm²]

h_0 je počáteční výška vzorku [mm]

Δh je změna původní výšky [mm]

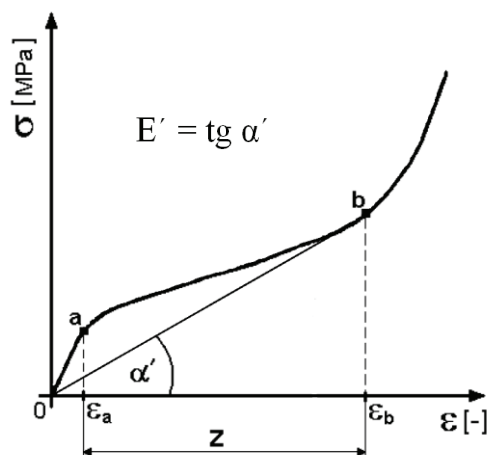
Diagram dle obr. 2.4 byl získán volným stlačováním elastomerového válcového bloku. Z křivky je patrné, že modul pružnosti není konstantní ve většině oblastí. Pouze při velmi malých deformacích můžeme křivku považovat za přímku a předpokládat zde platnost Hookova zákona, že modul pružnosti E je konstantní.

Existuje několik metod, jak ho určit. První z nich je experimentální zatěžování vzorků o různých tvrdostech, další je metoda vtlačování válcového lisovníku do pouzdra s elastomerem s předepsanými parametry. Lze ho určit také odhadem ze změřené tvrdosti. U oblastí s vyšší deformací dochází k překročení meze kluzu a tedy i k plastickým deformacím. Pro tyto oblasti určíme tzv. modul plasticity E' .

$$E' = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \tan \alpha' [MPa], \quad (2.3)$$

kde α' je úhel sklonu spojnice [°]

Modul plasticity není konstantní, jelikož se mění s narůstající deformací (závislost $\sigma=f(\varepsilon)$ není lineární). Jedná se o okamžitou hodnotu, kterou lze ji určit v pracovním rozsahu elastomerového nástroje.



Obr. 2.4 Tahový diagram [22]

2.2 Tvářecí síla [18,22]

Při metodách tváření elastomery jsou kladené nároky na větší výkon strojů než u konvenčních metod a metod tváření kapalinou. Tento fakt je dán nutností síly k přetvoření elastomeru. Celková tvářecí síla je tedy dána součtem síly potřebné pro vlastní tváření polotovaru, síly nutné k překonání třecích odporů a síly nutné k přetvoření a přemístění elastomeru.

$$F_c = F_{tv} + F_{tř} + F_E \quad [N] \quad (2.4)$$

kde F_{tv} je síla potřebná pro vlastní tváření [N]

$F_{tř}$ je síla nutná k překonání třecích odporů [N]

F_E je síla nutná k přetvoření elastomeru [N]

Z charakteru průběhu tvářecí síly nástroje dle obr. 2.5 lze vyčíst u polyuretanového nástroje větší nutnou vykonanou práci oproti použití konvenčního nástroje. Rozdíl práce při konvenčním způsobu tváření a práce při tváření polyuretanem znázorňuje vyšrafovaná oblast mezi křivkami (tzv. nadbytečná práce). U konvenčního nástroje tvářecí síla F_c na počátku tváření roste a asi v polovině zdvihu začne klesat téměř na nulu, kde je ovlivňována pouze třecími silami, ale u polyuretanového nástroje neustále roste, jelikož dochází ke stále intenzivnějšímu přemísťování a tvarování nástroje.

Složka síly potřebné pro vlastní přetvoření polotovaru F_{tv} je dána součinem celkového tvářecího tlaku nutného pro vytvarování polotovaru a plochy polotovaru, na níž působí tlak elastomeru.

$$F_{tv} = q \cdot S \quad [N], \quad (2.5)$$

kde q je celkový tvářecí tlak [MPa]

S je tvářená plocha, na níž tlak působí [mm²]

Obecně platí, že se elastomery při stlačování chovají pružně. Sílu nutnou k přetvoření elastomeru F_E lze tedy vyjádřit pro velmi malá stlačení a jednoosý tlak z Hookova zákona. S uvažováním malých deformací a vlivu uchycení čel dílce se uvádí vztah pro deformační sílu.

$$F_E = \beta_e \frac{1}{3} E S_e \left(\frac{1}{\lambda^2} - \lambda \right) \quad [N], \quad (2.6)$$

kde E je modul pružnosti pro malé deformace [MPa]

S_e je plocha deformovaného průřezu [mm²]

λ je deformační činitel [-]

$\lambda = 1 - \Delta h/h_0$ [-]

β_e je koeficient zpevnění, který zohledňuje tvar dílce a způsob uchycení [-]

$\beta_e = f(K_T)$

Metodika stanovení deformační síly musí odpovídat konkrétnímu technologickému schématu. Například pro schéma dle obr. 2.6, se vypočítá ze vztahu:

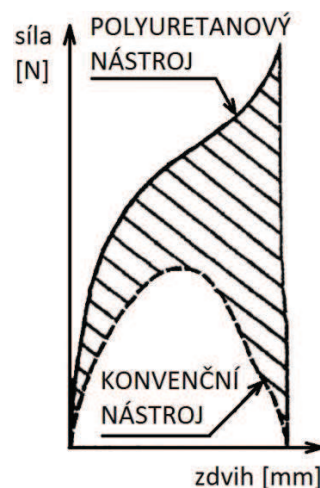
$$F_E = \frac{E_e \cdot K_T \cdot S_L \cdot v_e}{V} \quad [N], \quad (2.7)$$

kde E_e je modul pružnosti elastomeru [MPa]

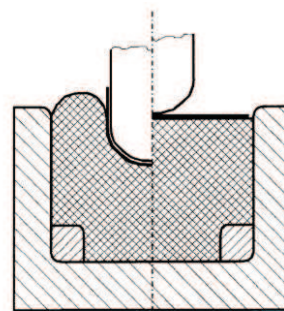
v_e je přemísťovaný objem elastomeru [mm³]

V je objem elastomerového bloku [mm³]

S_L je průřezová plocha lisovnicku [mm²]



Obr. 2.5 Charakter tvářecí síly [22]



Obr. 2.6 Schéma nástroje [18]

Síla elastomeru pro ploché dno lisovníku a kontejnerový nástroj zase vychází z předchozího vztahu 2.7. Je zde ovšem zahrnut také poloměr zaoblení čela r_L a hloubka ponoření ohybníku Δh_L .

$$F_E = \frac{1,5 \cdot \Delta h_L \cdot \sqrt{S_L} \cdot E_e}{\gamma_L [1 + 1,33 \cdot E \cdot \alpha_{od} (r_L + s_0)]} [N], \quad (2.8)$$

kde Δh_L je hloubka ponoření ohybníku [mm]

S_L je průřezová plocha lisovníku [mm²]

r_L je poloměr zaoblení čela [mm]

s_0 je tloušťka tvářeného polotovaru [mm]

γ_L zohledňuje vliv půdorysného tvaru lisovníku [-]

(pro kruh, čtverec $\gamma_L = 1$)

α_{od} zohledňuje odpory elastomeru v důsledku jeho přemístování [-]

$\alpha_{od} = f(E)$

Síla nutná k překonání třecích odporů F_{tr} je velice důležitá a ve výpočtech nezanedbatelná. Působí na kontaktních plochách mezi elastomerem a polotovarem. Ve většině případů je nežádoucí, jelikož zpomaluje proces tváření, ale v některých případech je vyžadována a ovlivňována. Pozitivní vliv má například při vyboulování nebo ohýbání trubek, kde zabraňuje přesunu materiálu, a tím i ztenčování stěny.

Vzorec pro určení třecí síly vychází z Coulombova zákona a je obecně formulován následujícím vztahem.

$$F_{tr} = f \cdot q \cdot S [N], \quad (2.6)$$

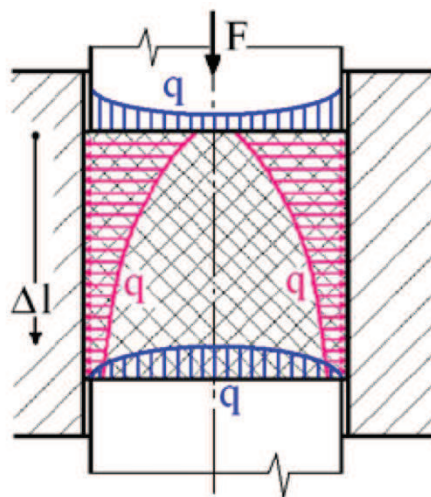
kde f je součinitel tření [-]

Součinitel tření závisí na mnoha faktorech, jako je materiál polotovaru, mazivo, teplota a další. Stanovení skutečných třecích sil v oblasti tváření elastickými nástroji je problematické a vyžaduje provedení mnoha experimentů.

2.3 Rozložení tlaku [18]

Pomocí experimentu bylo prokázáno nerovnoměrné rozložení tlaku při stlačování elastomerového válečku ve válcovém pouzdře. Sledován byl tlak na čelech horního pohyblivého lisovníku, spodního nepohyblivého lisovníku, a také na boční stěně pouzdra. Bylo zjištěno, že maximální tlak u horního lisovníku je u stěny pouzdra a minimální tlak je uprostřed pouzdra, zatímco maximální tlak u dolního lisovníku je uprostřed a minimální tlak je u stěny. Tlak na boční stěnu se od horního lisovníku směrem k dolnímu lisovníku snižuje. Platí tedy, že s rostoucí výškou elastomeru se tlak na stěnu mění.

Na obr. 2.7 je graficky znázorněno schéma rozložení tlaku v pouzdře.

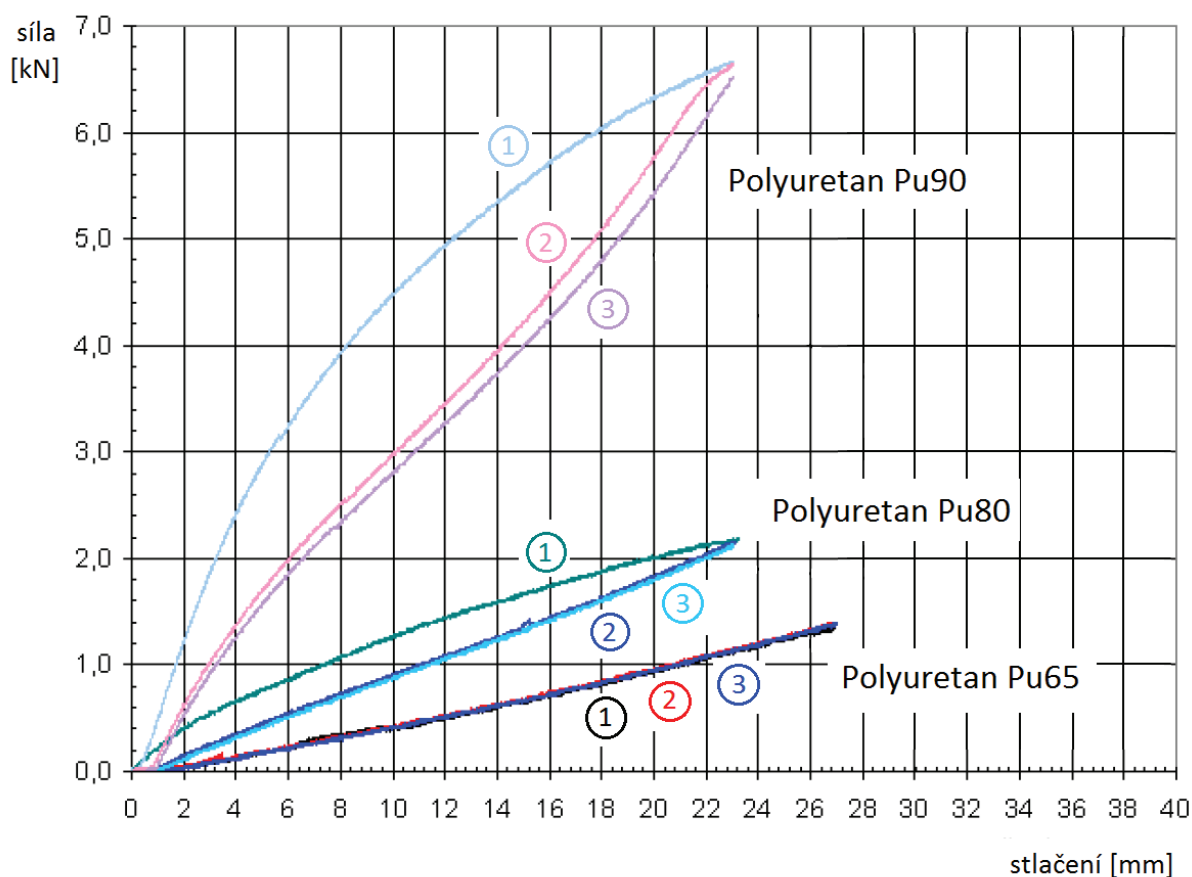


Obr. 2.7 Rozložení tlaku elastomeru v pouzdře [18]

2.4 Mullinsův efekt [5,18]

Mullinsův efekt je důležitý jev, který je zkoumán za účelem modelování chování průmyslových pryžových materiálů. Princip spočívá v měknutí elastomeru vlivem cyklického zatěžování. Tento jev způsobuje mikroskopické poškození struktury, jako například vazeb mezi částicemi plniva a rozvětvenými molekulárními řetězci.

Byly prováděny experimenty, při kterých se ukázalo, že se průběh síla-deformace ustálí již při druhém, maximálně třetím stlačení. Výsledek jednoho takového experimentu je zobrazen v diagramu na obr. 2.8, kdy byly stlačovány tři polyuretanové válečky různých tvrdostí.



Obr. 2.8 Diagram experimentálního zatěžování [18]

Z diagramu je patrné vyšší napětí potřebné při prvním zatížení a téměř totožný průběh u druhého a třetího zatížení. Průběhy křivek se nejvíce liší u tvrdých materiálů, zatímco u měkkých materiálů jsou téměř totožné. Vliv tvrdosti je zde tedy velice podstatný, přičemž s rostoucí tvrdostí má křivka strmější směrnici a větší tuhost.

Tento jev je mimochodem také velmi důležitý ve zdravotnictví, kde je zkoumáno zatěžování cévních stěn.

3 METODY TVÁŘENÍ ELASTOMERY [8,16,18,22]

V následujících stránkách bude řeč o metodách, výhodách a nevýhodách tváření elastomery. Tyto metody patří do kategorie tváření nepevným nástrojem, kam patří obecně kromě elastomeru, také kapalina.

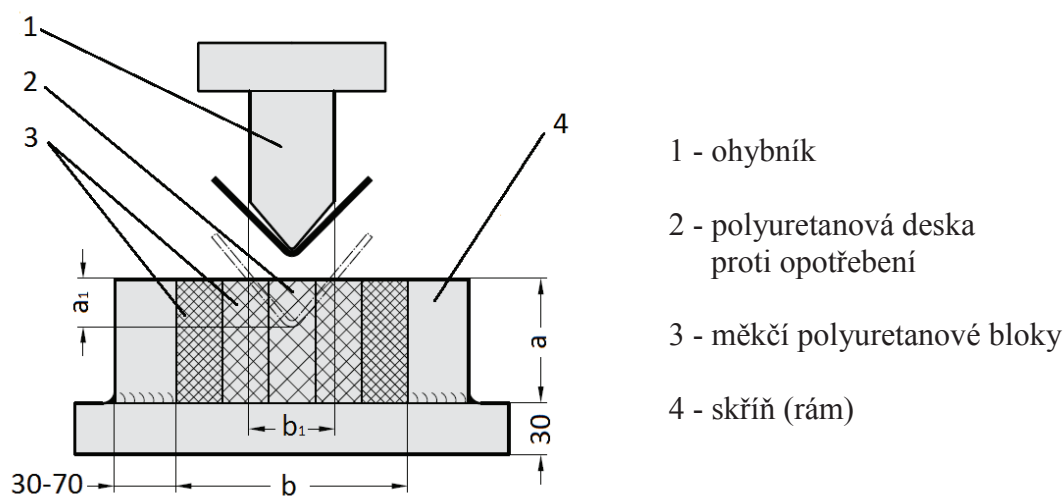
Technologii tváření pomocí elastomeru lze využít téměř ve všech metodách tváření, jako jsou ohýbání, stříhání, tažení atd. Jak již bylo zmíněno, nahrazena bývá jedna část nástroje a to buď lisovnice nebo lisovnice. Druhá část nástroje musí být z pevného materiálu (oceli) a má tvar podle požadovaného výrobku. Elastomer se používá výhradně v plošném tváření, neboli tváření tenkých plechů. Podle dané technologie se volí vhodný materiál s vhodným deformačním chováním (pryž, polyuretan). Výhodou pryže je velký rozsah teplot a cena, nevýhodou jsou malé měrné tlaky a životnost. Výhodou polyuretanu je větší měrný tlak, větší rozsah tvrdostí a životnost, nevýhodou naopak cena a malý rozsah teplot.

3.1 Tváření otevřeným nástrojem [10,18]

Pro metodu ohýbání se využívá otevřeného nástroje. Tento nástroj se skládá z ohybnice, což je elastomerový blok, který je uložen do kontejneru položeného na pracovním stole a ohybníku, což je razník upnutý na beranu lisu.

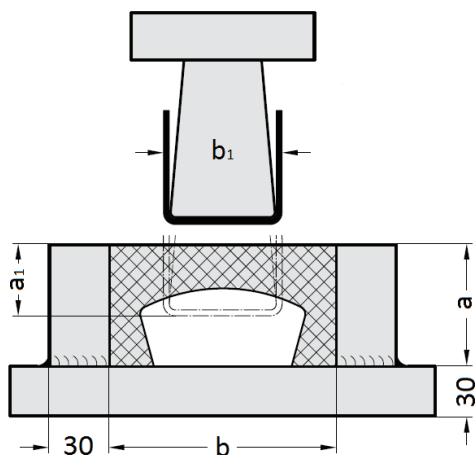
Pohyblivý razník sjíždí dolů do polotovaru, který je zatlačen do elastomerového bloku, a tím dojde k vytvarování. Ohnutí je dokončeno najednou pomocí jediného zdvihu. Za účelem zvýšení životnosti elastomerového bloku je v místě největšího tlaku nahrazen deskou proti opotřebení s tvrdostí 95 ShA.

V technologii tváření metodou ohýbání se používají dva druhy ohybu a to ohyb do tvaru 'V' (obr. 3.1) a ohyb do tvaru 'U' (obr. 3.2 a 3.3).

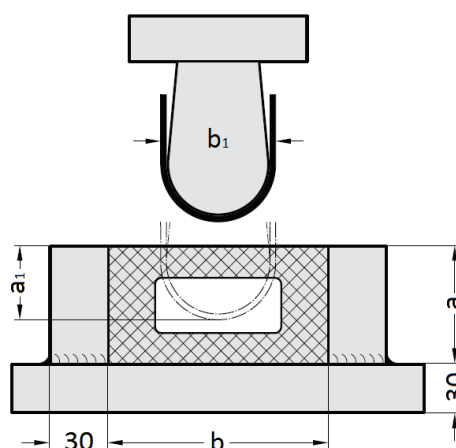


Obr. 3.1 Ohyb do tvaru V s deskou proti opotřebení [10]

Otevřeným nástrojem nelze provádět operace stříhání a tažení. Největší výhodou je samozřejmě jednoduchost, univerzálnost a cena elastomerového bloku. Další výhodou je možnost ohýbat leštěné a povrchově upravené povrchy bez porušení, jelikož nedochází k tření kovu o kov. Nevýhodou je životnost elastomerového bloku, větší tvářecí síla a odpružení polotovaru, které způsobuje, že se ohnutý materiál vrací o pár stupňů (1 až 3°) do původního tvaru. Z toho vyplývá, že je nutné provést ohnutí o něco větší, než je požadováno.

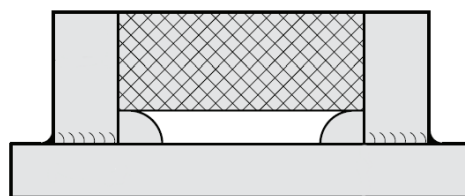


Obr. 3.2 Ohyb do tvaru U
s rovným dnem [10]



Obr. 3.3 Ohyb do tvaru U
s oblým dnem [10]

Pro snížení tvářecí síly a dosažení snadnějšího vytvarování za působení větších bočních sil se používají odlehčené polyuretanové bloky s dutinou nebo lze blok podložit pevnou podložkou (obr. 3.4). Na krajích podloženého elastomeru dojde ke zvýšení tlakového napětí, a tím také k větší boční síle při tváření.



Obr. 3.4 Podložení pevnou deskou [10]

Ohýbání elastomerem má největší využití v kusové a malosériové výrobě, ale také často bývá jedinou možností v sériové výrobě. Je vhodné k výrobě prototypů součástek v leteckém průmyslu.

Výhody:

- malé náklady na výrobu nástroje
- nedochází ke zvlnění
- jedna ohybnice pro více ohybníků (univerzálnost)
- možnost odlehčení elastomeru (menší náklady, menší stroje, větší úhel ohnutí, lepší rozložení síly)
- nedochází k výraznému poškození povrchu polotovaru
- nedochází ke ztenčení
- použití jednočinných lisů
- malé nároky na přesnost stroje

Nevýhody:

- rychlé opotřebení elastomeru
- jen pro malé tloušťky
- velké odpružení elastomeru
- velké síly na přetvoření
- potřeba těžkotonážních lisů
- absence upínání

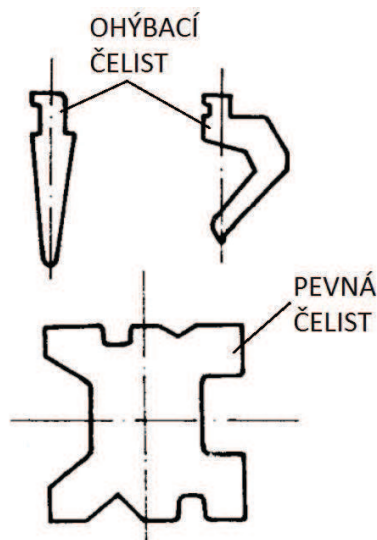
Tab. 3.1 Parametry ohýbání otevřeným nástrojem [18]

	V	U	
tvrdost elastomeru	65, 85 ShA, deska proti opotřeбенí 95 ShA		
zpracovávaný materiál	uhlíkové oceli a hliníkové slitiny		
tloušťka materiálu	3 až 6 mm		
hloubka vnoření ohybníku do ohybnice	a ₁ = 30-40 % z a	a ₁ = 50-60 % z a	a ₁ = 40-50 % z a
		obr. 4.3	obr. 4.2
šířka ohybníku	b ₁ = 30-40 % z b	b ₁ = 50-60 % z b	b ₁ = 50-60 % z b
		obr. 4.3	obr. 4.2
pracovní tlak	menší než 200 MPa		
pracovní plocha	50 x 250 mm až 200 x 500 mm		
stroje	hydraulické jednočinné lisы		

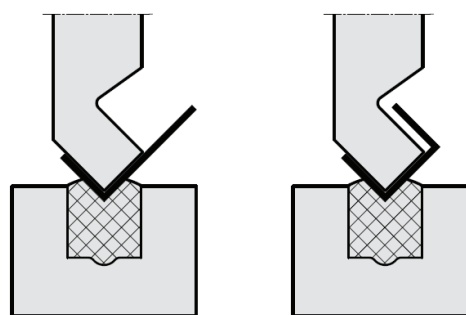
3.1.1 Ohýbání [10,15,18,20]

Při ohýbání plechů se často provádí ostré ohýbání (tzn. $\frac{R}{s} \leq 3$ až 9) v různých úhlech pomocí ohraňovacích lisů. U konvenčního způsobu (obr. 3.5) se nástroj skládá z pohyblivého ohybníku a pevné ohybnice, která musí být vyrobena jako prismatická zápustka opatřená několika odlišnými výřezy. Při ohýbání elastomerem (obr. 3.6) je prismatická zápustka nahrazena univerzálním elastomerovým blokem. Pohyblivý ohybník zůstává stejný. Různé tvary se tvoří kombinací ohybu geometrie V a U.

Výhody a nevýhody jsou shodné jako u běžného ohýbání otevřeným nástrojem. Uplatnění v kusové a malosériové výrobě.



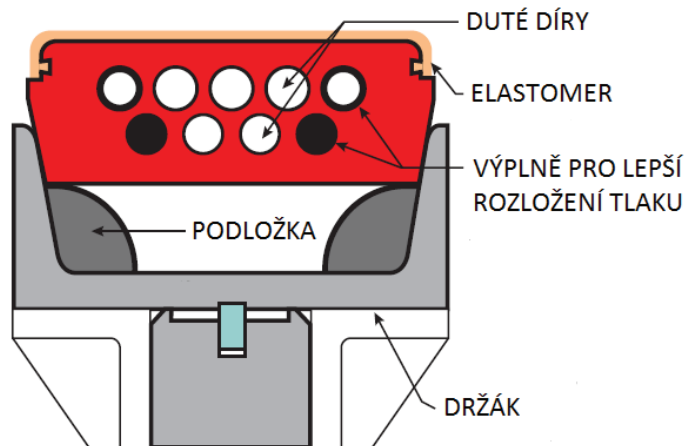
Obr. 3.5 Konvenční nástroj [15]



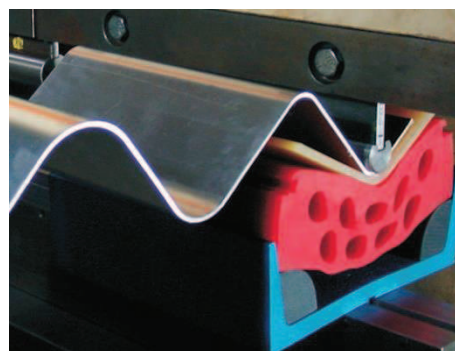
Obr. 3.6 Elastomerový nástroj [10]

Elastomerová lisovnice je také samozřejmě vhodná na tvorbu různých rádiusů.

Na obr. 3.7 a 3.8 je ukázka nástroje firmy Polyurethane Products, který se nazývá SMP1240 Smart Pad System. Tato společnost vyrobila stovky razníků a matic v průběhu posledních 30 let.



Obr. 3.8 SMP1240 Smart Pad System [20]



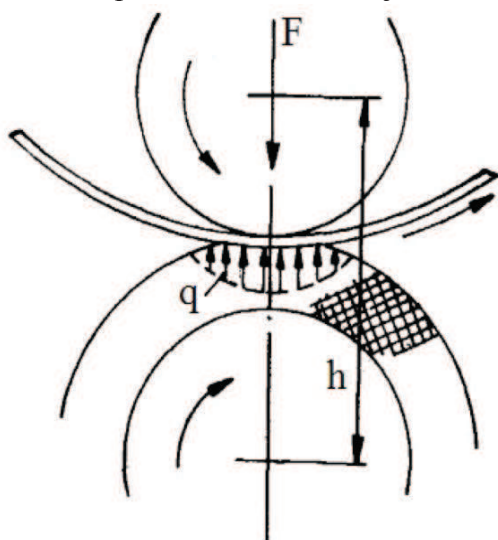
Obr. 3.7 Ukázka SMP1240 [20]

Nástroj je určen k ohýbání plechů o poloměru od 25 mm do 100 mm do úhlu 90° na jeden zdvih. Maximální tloušťka plechu je 3 mm. Šířka razníku může být od 50 mm do 200 mm a jeho maximální hloubka průniku 75 mm.

3.1.2 Zakružování [7,18,26]

Mezi technologie tváření otevřeným nástrojem patří také zakružování. Cílem je získání válcové nebo kuželové součásti z rovného plechu. Provádí se plynulým průchodem plechu mezi válci. U konvenčního způsobu se využívají ruční nebo strojní zakružovačky (stroje), jejichž nástrojem jsou minimálně tři válce.

Zakružování pomocí elastomeru se provádí na dvouválcové zakružovačce (obr. 3.9) a je určena pro tenké plechy. Horní válec vyrobený z pevného materiálu (ocel), má menší průměr a je nastavitelný. Dolní válec o větším průměru je pokryt vrstvou elastomeru a je nepohyblivý. Princip spočívá v zatlačování horního pohyblivého válce do dolního (pružného). Vložením plechu mezi válce dojde ke vzniku rádiusu, který závisí na hloubce vtisku.



Obr. 3.9 Dvouválcová zakružovačka [18]

Výhody jsou jednodušší konstrukce oproti konvenčním zakružovačkám, součástka je vyrobena na jeden průchod, lze zakružovat leštěné, lakované, foliované, děrované a jinak povrchově upravené plechy (nedojde k poškození), lze vyrábět různé rádiusy jedním nástrojem (nastavení osové vzdálenosti), zakružování kuželů, lze vyrábět plechy s proměnnou křivostí díky snadnému NC řízení.

Nevýhodou je robustnost stroje, nutnost velkých tvářecích sil, rychlé opotřebení elastomeru a využití jen pro tenké plechy.

Využití metody ve velkosériové výrobě k zakružování tenkostěnných plechů a na zakružování plechů do kuželů. V malosériové výrobě k zakružování různých poloměrů.

Na obr. 3.10 je ukázka detailu válce dvouválcové zakružovačky firmy Weldlogic. Jedná se o plně automatizovaný dvouválcový zakružovací systém.

Na snímku je vidět horní pohyblivý ocelový válec, který při zakružování sjede dolů do pevného válce pokrytého červeným polyuretanem. Stroj je určen pro tvorbu malých průměrů. Nad horním válcem se nachází rameno, které zamezuje průhybu válce při výrobě malých průměrů. Díky tomu lze zvýšit rozměry tenkostěnného plechu. Toto rameno je navrženo tak, aby se přizpůsobilo menšímu průměru horního válce pomocí nastavitelných kolíků, bez použití nářadí.



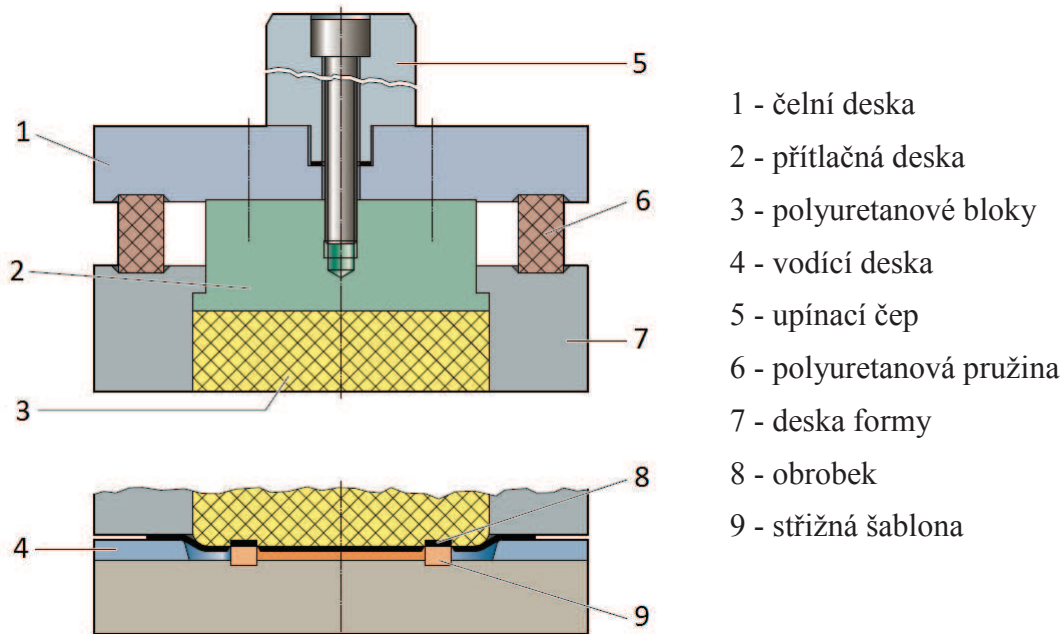
Obr. 3.10 H.D.H. 2 Roll Mandrel Support Arm [26]

3.2 Tváření uzavřeným nástrojem [10,15,16,17]

Uzavřený nástroj se používá ke stříhu, ohýbání a tažení. Od otevřeného nástroje se liší tím, že je v horní pohyblivé části polyuretanová lisovnice a ve spodní části nepohyblivý pevný lisovník. Polyuretanový blok je uložený v kontejneru se stopkou.

Princip je, že kontejner s elastomerem sjede dolů pomocí beranu lisu a dosedne na polotovar, který je umístěný na ponorné desce. Za působení tlaku dojde k vytvarování polotovaru. Ukázka uzavřeného nástroje je na obr. 3.11.

Síla potřebná pro tváření plechu je vyšší oproti konvenčním metodám a metodám tváření otevřeným nástrojem. Důvod je ten, že během tváření dojde k zamezení volného toku elastomeru, čímž vzroste tvarový součinitel, a tím i celková tvářecí síla.



Obr. 3.11 Uzavřený nástroj [10]

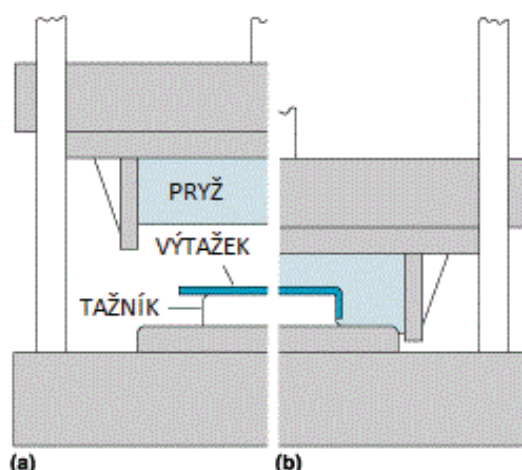
Výhodou je nulové odpružení materiálu, nedochází ke zvlnění, nízká cena oproti konvenčním technologiím, jednoduchá konstrukce a kombinace více technologií (ohýbání, stříhání a tažení).

Nevýhody jsou nutnost použití těžkotonážních lisů (vyšší tvářecí síla), vyšší cena oproti otevřenému nástroji, nízká životnost elastomeru a použití jen pro tenké plechy.

3.2.1 Metoda Guerin [2,4,10,15,18,24]

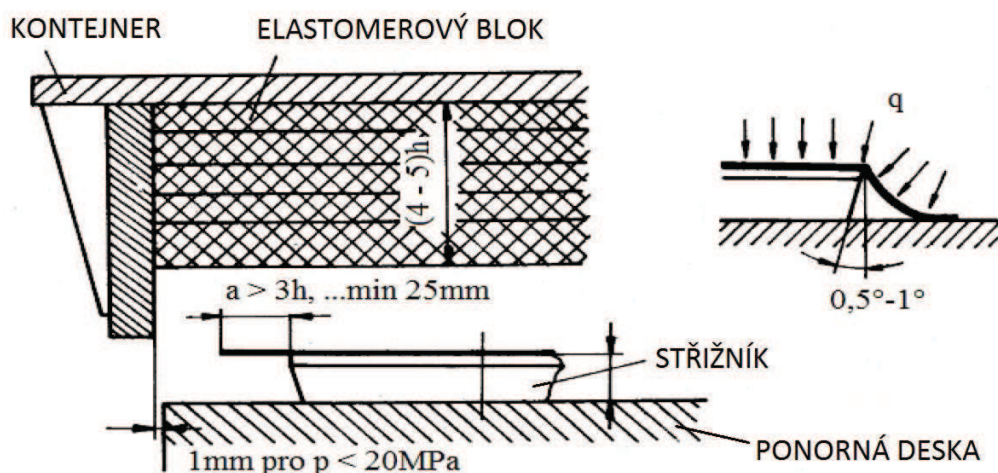
Tento proces byl vynalezen během druhé světové války v Douglas Aircraft Company v USA. Jedná se o nejstarší metodu tváření elastickým nástrojem. Metoda je využívána pro technologie ohýbání, lemování, stříhání, mělké tažení a jejich kombinace.

Princip je založen na elasticitě pryže, která je uložena v ocelovém kontejneru (lisovnice) ve formě buď jednoho elastomerového bloku (pro mělké tažení a ohýbání) nebo je tvořena několika deskami elastomeru (pro stříhání). Lisovnice sjede na polotovar a působením tlaku elastomerového bloku dojde k vytvarování. Pro univerzální tažnici lze použít tažníků o různých rozměrech a tvarech, ovšem životnost pryže je velmi nízká. Během procesu není nutnost užití přídržovače. Na obr. 3.12 je znázorněn princip mělkého tažení.



Obr. 3.12 Metoda Guerin [2]

Pro technologii stříhání metodou Guerin se používá elastomerový blok složený z několika pryžových desek tloušťky 25 až 30 mm o zvýšené tvrdosti (78 až 85) Sh. Vlivem narůstajícího tlaku dochází k namáhání tahem na okraji střížníku, dokud nedojde k utržení. Aby nastalo utržení, musí polotovar dostatečně přesahovat přes okraj střížníku, jinak dojde jen k ohybu polotovaru. Princip stříhání je zobrazen na obr. 3.13.



Obr. 3.13 Stříhání metodou Guerin [18]

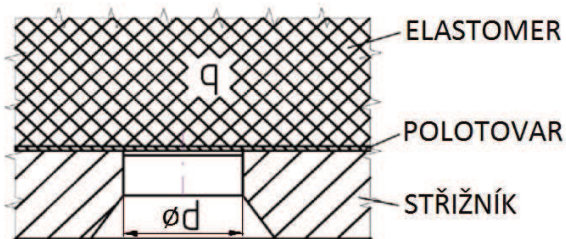
Lze také stříhat vnitřní otvory (obr 3.14), ale musí být splněna podmínka vystřihnutí díry. Jde o to, že pracovní síla F_p musí být větší než střížná síla F_s , potřebná k ustřížení materiálu.

$$F_p = q \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} > \pi \cdot d \cdot s \cdot \tau_s = F_s, \quad (3.1)$$

kde d je průměr otvoru [mm]

s je tloušťka materiálu [mm]

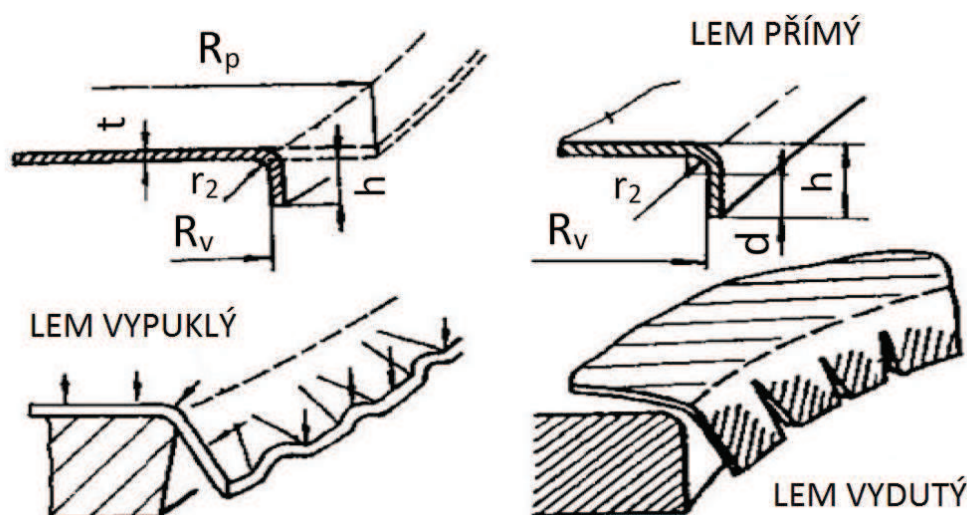
τ_s je mez pevnosti ve smyku [MPa]



Obr. 3.14 Stříhání otvorů [18]

Za účelem bezpečnosti, vyztužení okrajů, nebo jen ozdobení plechů, provádíme lemování. Jedná se o ohýbání okrajů plechů v rovině nebo v prostoru. Podle zakřivení okraje rozlišujeme přímý lem, vypuklý lem a vydutý lem. Jejich geometrii máme na obr. 3.15.

U přímého lemu nedochází k žádným nežádoucím jevům. U vypuklého lemu ($R_v < R_p$) dochází ke zvlnění vlivem tlakových napětí, kdežto u vydutého lemu ($R_v > R_p$) je materiál natahován a může dojít ke vzniku trhlin. Vznik vad lze obecně potlačit menší výškou lemu, větší tloušťkou plechu, anebo menším úhlem ohybu.



Obr. 3.15 Geometrie lemů [15]

Ohýbací nástroj může být konvenční (ocelový) nebo nepevný (elastický). Použitím konvenčního nástroje lze zamezit vzniku vad lépe, díky malé tažné mezeře. Nepevný nástroj je tvořen elastomerem, který musí být dostatečně tvrdý. Obecným nežádoucím jevem je odpružení materiálu, které musíme kompenzovat větším ohnutím.

Výhodou lemování pomocí elastomeru je levný nástroj, univerzálnost pro různá zakřivení a možnost lemovat leštěné a povrchově upravené plechy.

Nevýhody jsou rychlé opotřebení elastomeru, možnost lemovat pouze tenké plechy a horší geometrie lemu, kdy je nutná větší výška lemu oproti konvenčnímu nástroji ($h_{\min} = r_{2\min} + 2t$ pro konvenční, $h_{\min} = r_{2\min} + 5t$ pro polyuretan).

Výhody:

- malé náklady na výrobu nástroje
- jednoduchá konstrukce
- jedna tažnice (střížnice) pro více tažníků (střížníků) - univerzálnost
- nedochází ke zvlnění
- použití jednočinných lisů
- výroba rozměrných výtažků (běžně 1000 x 1000 mm)
- možnost kombinování metod
- stříhání několika součástí najednou
- možnost použití desky proti opotřebení
- tažení povrchově upravených a leštěných plechů
- malé nároky na přesnost stroje

Nevýhody:

- rychlé opotřebení elastomeru
- jen pro malé tloušťky
- nutnost dodržení přesahu u stříhání (minimálně 25 mm)
- nekvalitní plocha stříhu (nutnost dodatečného opracování)
- potřeba těžkotonážních lisů
- potřeba těžkotonážních lisů
- nízká životnost pryžového nástroje (2000 až 3000 výstřižků)
- nepřítomnost přidržovače - tažení pouze mělké

Tab. 3.2 Parametry metody Guerin [18]

	stříhání	mělké tažení	ohýbání
tvrdost pryže	(75 až 95) Sh	(45 až 55) Sh	(55 až 65) Sh
zpracováváný materiál	měkké uhlíkové oceli a hliníkové slitiny	uhlíkové oceli, Al, Ti slitiny	uhlíkové oceli a hliníkové slitiny
tloušťka zpracovávaného materiálu	ocel 2,5 mm, dural 1,2 mm, hliník 2 mm	ocel 1,5 mm duraly a hliník 2 mm	ocel 1,5 mm duraly a hliník 2 mm
výška lisovníku	(6 až 13) mm 4krát tloušťka materiálu	(6 až 13) mm	(6 až 13) mm
přesah plechu přes kraj střížníku	minimálně 25 mm, jinak 3krát výška střížníku	minimálně 25 mm, jinak 3krát výška tažníku	-
tloušťka polyuretanového bloku	5 až 8krát větší než výška střížníku	5 až 8krát větší než výška tažníku	5 až 8krát větší než výška ohybníku
počet bloků	několik	1	1
pracovní tlak	5 až 20 MPa	menší než 25 MPa	menší než 25 MPa
pracovní plocha	250 x 250 mm 1000 x 1000 mm může být až 6 m ²	250 x 250 mm 1000 x 1000 mm	250 x 250 mm 1000 x 1000 mm
zkosení hrany střížníku	0,5° až 1°	-	-
stroje	hydraulické a vřetenové lisy	hydraulické lisy	hydraulické lisy

Výrobou hydraulických lisů využívajících metodu Guerin se zabývá firma Beckwood Press. Na obr. 3.16 je ukázka jejich produktu Beckwood 810, který je určen leteckým společností pro krátkodobou výrobu leteckých součástí. Jedná se o těžkotonážní hydraulický lis se silou 810 tun.

Rozměry vyměnitelné pracovní desky jsou 760 x 1120 mm, tloušťka polyuretanové desky je 230 mm a zdvih beranu je 254 mm. Rychlost beranu je při sjezdu 79 cm/min, v průběhu lisování 23 cm/min a při vrácení do původní polohy 99 cm/min. Chlazení je poskytováno vodním/olejovým výměníkem tepla a řízeno termostatem.

Metoda Guerin má využití v kusové a malosériové výrobě. Je určena k výrobě tenkostěnných rozměrných výlisků, rozměrných nádob, reflektorů, přístřihů, rozvinutých tvarů a ke skupinovému vystřihování. Lze provádět technologie stříhání, ohýbání, a také mělké tažení do 10 mm. Velké využití má v automobilním a leteckém průmyslu. Příklad výrobku je na obr. 3.17.

Z metody Guerin byla vyvinuta metoda Wheelon, neboli také Verson-Wheelon. Jedná se o technologii tváření kapalinou, kdy je elastomerová lisovnice nahrazena kapalným médiem. Užívá se k tažení mělkých výtažků.



Obr. 3.16 Beckwood 810 [4]

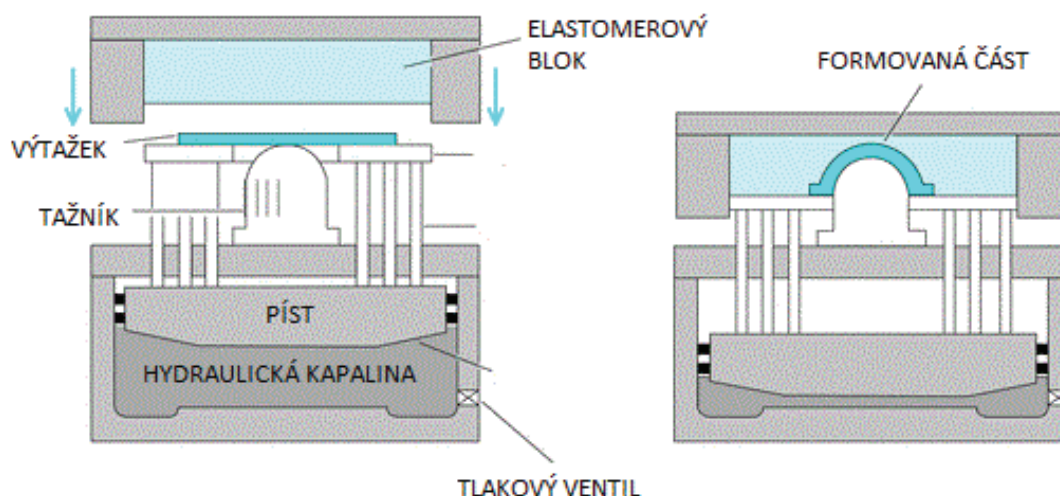


Obr. 3.17 Výrobek metodou Guerin [10]

3.2.2 Metoda Marform [2,10,13,18,24,26]

Metoda Marform, kterou vyvinuli v Glen L. Martin Company v USA, je zdokonalení metody Guerin. Využívá se pro hluboké tažení.

Stejně jako u metody Guerin spočívá princip v nahrazení pohyblivé pevné lisovnice konvenčního nástroje kontejnerem s elastomerovým blokem. Liší se nižší tvrdostí (45 až 55) Sh, množstvím elastomeru, který musí mít hloubku minimálně 3x větší než je hloubka výtažku a přítomností přidržovače (nezastoupí ho samotný elastomer). Přidržovač je řízen hydraulicky prostřednictvím přepouštěcího ventilu, který reguluje přítlačnou sílu v závislosti na zdvihu. Tlak v elastomeru se během tažení pohybuje mezi 5 až 45 MPa. Princip je znázorněn na obr. 3.18.



Obr. 3.18 Metoda Marform [2]

V první fázi tažení sjede elastomerová tažnice dolů k polotovaru a stlačuje přidržovač dokud nedojde k překročení požadované přidržovací síly. Ve druhé fázi sjíždí tažnice stále dolů společně s přidržovačem o konstantní přidržovací síle a dochází k procesu tažení. Třetí fáze nastane po dokončení výtažku, kdy se elastomerová tažnice a přidržovač vrátí nahoru do výchozí polohy.

Metoda je vhodná pro výrobu prototypů díky nízké ceně a levné údržbě. Lze vyrábět jednoduché rotační výtažky, ale i hranaté výtažky a geometricky složité tvary. Během tažení působí velký tlak pryže rovnoměrně na povrch výrobku, a tím zamezuje ztenčování a osově vytahování polotovaru. Užívá se taky tam, kde je nutné zachovat kvalitní povrch výrobku. Nevýhodou je opět velmi nízká životnost oproti konvenčnímu nástroji a nutnost dvojčinného lisu nebo přidavného zařízení u jednočinného lisu kvůli správné funkci přidržovače.

Výhody:

- malé náklady na výrobu nástroje
- lze použít na hluboké taky díky použití přidržovače
- jedna tažnice pro více tažníků - univerzálnost
- nedochází ke ztenčení plechu
- nedochází ke zvlnění díky použití přidržovače
- nedochází k poškození povrchu
- velmi nízký součinitel tažení
- výroba rozměrných výtažků
- výroba geometricky složitých výtažků
- malé nároky na přesnost stroje

Nevýhody:

- potřeba dvojčinného lisu, nebo přidavného zařízení u jednočinného
- jen pro malé tloušťky
- nízká životnost nástroje (2000 až 3000 výtažků)
- potřeba velký sil při tažení
- vyšší náklady proti metodě Guerin

Tab. 3.3 Parametry metody Marform [18]

	Hluboké tažení
tvrdost pryže	(45 až 55) Sh
zpracováváný materiál	uhlíkové oceli, Al, Ti slitiny
tloušťka materiálu	Ocel 1,5 mm, duraly a hliník 2 mm
počet bloků	1
pracovní tlak	menší než 25 MPa
pracovní plocha	250 x 250 mm až 1000 x 1000 mm
stroje	hydraulické dvojčinné lisy, nebo jednočinné lisy s přidavným zařízením

Ukázka hydraulického marform lisu je na obr. 3.19. Jedná se o model H od firmy Loewy. Lis je určen k tažení o síle 6500 tun. Vzdálenost beranu od pracovní desky je 1435 mm, celková výška lisu je 14 m, výška nad podlahou je 9,75 m. Maximální pracovní tlak na pryžovou podložku je 10 000 PSI, pracovní plocha je 8187 cm². Hydraulický pracovní tlak je 280 PSI. Rychlý posun dolů a zpět je 584 cm/min, lisovací rychlost je 70 cm/min.



Obr. 3.19 Loewy 6500 [13]

Metoda Marform má uplatnění v kusové a malosériové výrobě díky nízkým nákladům. Používá se pro výrobu tenkostěnných a rozměrných součástí, automobilových karoserií a leteckých součástí. Uplatnění má zejména v automobilním a leteckém průmyslu. Příklad výrobku je na obr. 3.20.

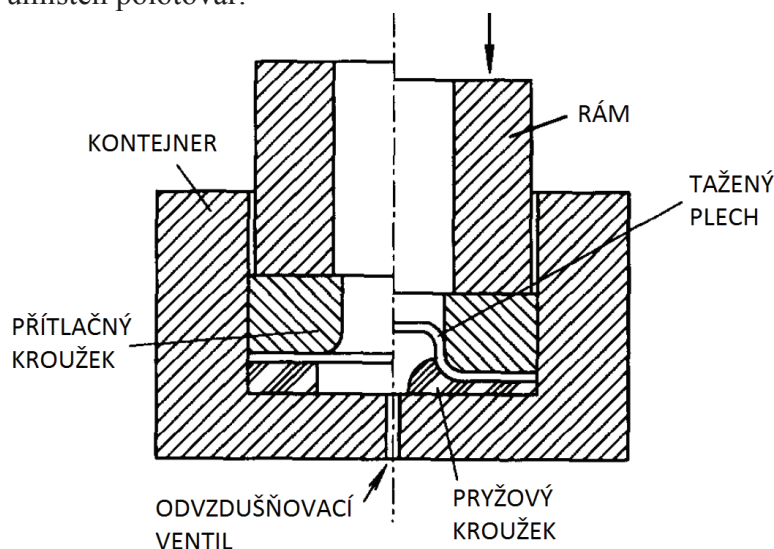
Obdobou metody Marform je metoda tváření kapalinou zvaná Hydroform (obr. 3.16). Používá se pro hluboké tažení. Tažnice je zde nahrazena kapalinou uzavřenou v tlakové nádobě pryžovou membránou. Používá se pro hluboké tažení.



Obr. 3.20 Výrobek metodou Marform [10]

3.2.3 Metoda Maslenikov [18,24,25]

Maslenikov je metoda hlubokého tažení bez tažníku. Nástroj je tvořen pryžovým kroužkem, který nahrazuje tažník, a pevnou pohyblivou tažnicí. Mezi kroužek a tažnici je umístěn polotovar.



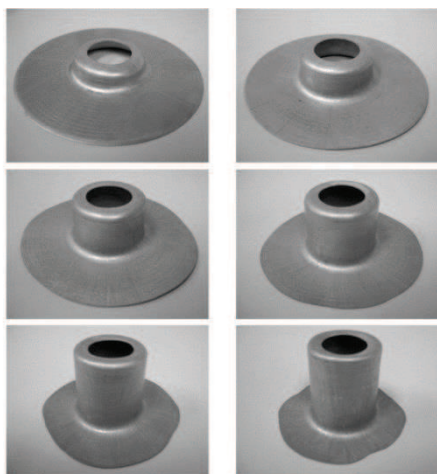
Obr. 3.21 Metoda Maslenikov [24]

Princip spočívá ve stlačování pryžového kroužku, který se vlivem deformace vmačkává do dutiny tažnice podle obr. 3.21. To způsobuje vznik tření mezi pryžovým kroužkem a polotovarem, který je do dutiny vtahován společně s kroužkem.

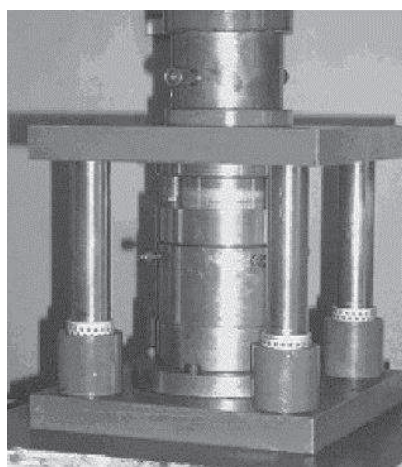
Opakovaným stlačováním lze dosáhnout velmi hlubokých výtažků. Důvodem je, že síla ke zplastizování příruby není přenášena stěnou výtažku (jako při použití tažníku), ale třením pryžového kroužku o přírubu a lze tedy docílit vysokých deformací.

Bylo dosaženo stupně tažení až $K=6$, proti běžným $K=2$. Počet cyklů potřebných k získání požadovaného stupně tažení závisí na různých faktorech, jako je tloušťka pryžového kroužku, průměr kroužku, průměr polotovaru, součinitel tření mezi pryží a polotovarem, mazání přitlačného kroužku a další. Metoda je méně častá. Používá se v kusové a malosériové výrobě pro hluboké výtažky.

V literatuře [25] byla provedena experimentální práce pomocí nástroje na obr. 3.23. Nástroj byl připojen k hydraulickému lisu o síle 200 tun. Vnitřní poloměr pryžového kroužku byl 5 mm a vnější poloměr 35 mm. Na obr. 3.22 je znázorněn výsledek tažení hliníkového kroužku o tloušťce 0,7 mm a vnitřním průměru 18 mm. Bylo provedeno celkem 6 cyklů tažení.



Obr. 3.22 Ukázka tažení [25]



Obr. 3.23 Nástroj bez tažníku [25]

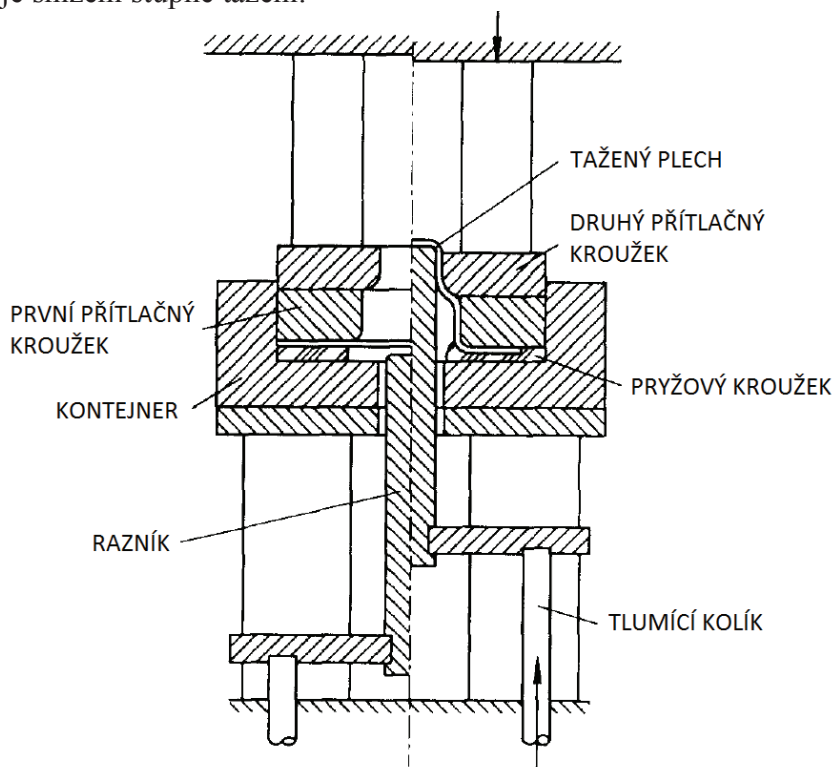
Rozměrovou přesnost a požadovanou tloušťku lze zlepšit použitím Maslenikovy metody s kovovým razníkem. Jak je patrné z obr. 3.24, nástroj se liší od obyčejného Maslenikovova nástroje přidáním druhého pevného přitlačného kroužku a pevného razníku. Přidaný přitlačný kroužek tvoří stupňovitou tažnici, pomocí které razník dotváří a zpřesňuje rozměry a tvar výtažku. Je zde tedy realizována kombinace Maslenikovy metody a konvenční metody tažení pevným nástrojem. Nevýhodou je snížení stupně tažení.

Výhody:

- levný nástroj
- nedochází ke ztenčení
- nedochází ke zvlnění
- nedochází k poškození povrchu
- lze použít na hluboké tahy
- univerzálnost nástroje (na jeden pryžový kroužek více přitlačných kroužků)
- méně tahů

Nevýhody:

- životnost pryžového kroužku
- jen pro malé tloušťky
- velké síly na přetvoření
- vždy zůstane lem (nelze dotáhnout celý materiál)

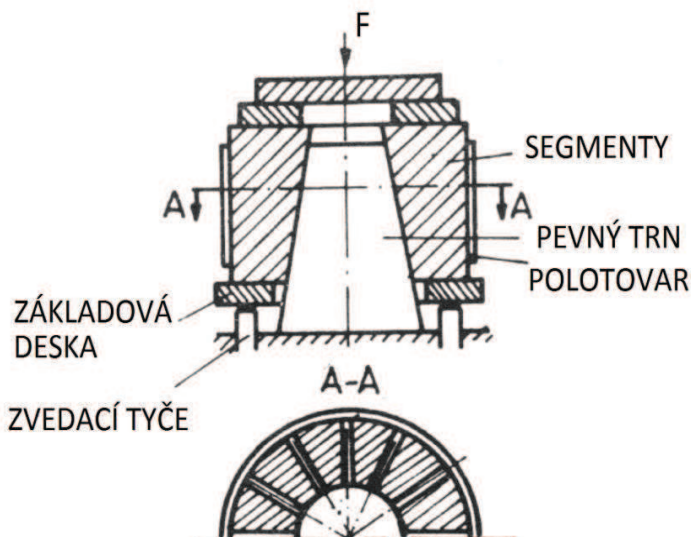


Obr. 3.24 Metoda Maslenikov s kovovým razníkem [24]

3.2.4 Radiální vypínání [10,14,18,22]

Radiální vypínání slouží k vyboulení nebo zúžení tenkostěnných nádob a trubek do více či méně složitých geometrických tvarů v meridiálním řezu. Metod, jak docílit požadovaného tvaru je hned několik. Patří mezi ně vypínání pevným nástrojem, hydraulické tváření, elektrohydraulické tváření, elektromagnetické tváření nebo tváření elastickým nástrojem.

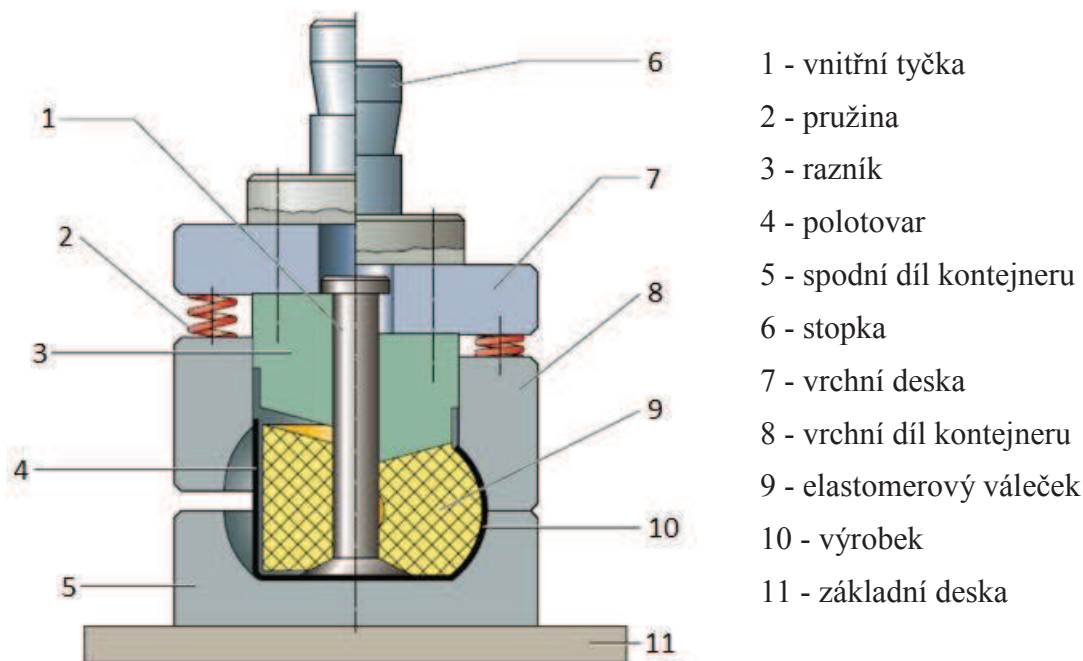
Vypínání pevným nástrojem je znázorněno na obr. 3.25. Jedná se o nejefektivnější a energeticky nejméně náročný způsob. Nástroj se skládá z pevného trnu a segmentů, které se vlivem síly beranu lisu nasouvají na trn. Tím dojde k rozpínání segmentů a vyvinutí tlaku na stěnu polotovaru. Výhodou je vysoká přesnost. Nevýhodou je zvětšování mezery mezi segmenty, což má za následek vznik hran na polotovaru podél okrajů jednotlivých segmentů. Dále dochází k nerovnoměrnému ztenčení materiálu, které je větší v mezeře mezi segmenty a menší v místech segmentů, kde působí třecí síly. Z tohoto důvodu je důležité mazání povrchu segmentů. Technologie radiálního vypínání pevným nástrojem se využívá zejména pro tvarování dílců ze žárupevných a vysokopevnostních slitin.



Obr. 3.25 Konvenční radiální vypínání [22]

Hydraulické tváření je moderní proces radiálního vypínání, kde je funkce segmentů nahrazena tlakem kapaliny, který vzniká působením síly lisovnicku (pístu) na kapalinu. Výhodou je menší tvářecí síla z důvodu nestlačitelnosti kapaliny a rovnoměrné přenášení tlaku na výrobek. Vznikají tak vysoce kvalitní výrobky o značné přesnosti. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena strojů, nutnost kvalitního těsnění nástroje a omezené rozměry výrobku. S metodou se lze setkat v leteckém, kosmickém a stále více v automobilovém průmyslu.

U radiálního vypínání elastickým nástrojem (obr. 3.26) se jako tvářecí médium používá polyuretan, který snáší tlaky 400 MPa až 1000 MPa. Nástroj se skládá z dvojdielného kontejneru ve spodní části, do kterého je vložen polotovaz a elastomerový váleček, který je většinou dutý a nasunutý na tyčce. V horní části nástroje je pevný razník, který sjede dolů a působí silou na elastomer. Razník někdy má zkosené dno, kvůli výhodnějšímu působení síly na elastomerový váleček (snadnější přemísťování). Vlivem deformace elastomeru dochází k jeho rozpínání a vytvarování výrobku. Plochy nástroje, které jsou ve styku s elastomerem, mají být leštěny, aby docházelo k minimálnímu tření, a tím zamezování toku elastomeru. Oproti konvenční metodě zde nedochází ke ztenčení materiálu, ani ke vzniku hran na okrajích segmentů. Metoda je vhodná také pro povrchově upravené polotovazy. Nevýhodou je vyšší tvářecí síla než u konvenčního a hydraulického vypínání, z důvodu síly potřebné k přetvoření elastomeru.



Obr. 3.26 Radiální vypínání elastomerem [10]

Na univerzitě VUT v Brně na Fakultě strojního inženýrství byl sestaven experimentální nástroj pro radiální vypínání tenkostěnných trubek do volného prostoru pomocí polyuretanu. Nástroj (obr. 3.27) je konstruován pro vypínání tenkostěnných trubek o průměru 20 mm s tloušťkou stěny 1 mm. Konce trubek mohou být volné i pevně uchycené. Nástroj je určen pro zkušební stroj ZD40.

Radiální vypínání pružným nástrojem má využití v kusové a prototypové výrobě. Společně s tvářením kapalinou se řadí mezi moderní metody v leteckém, kosmickém a automobilním průmyslu.

Výhody:

- levný nástroj
- kalibrace trubky
- nedochází ke zvlnění
- použití jednočinných lisů
- vypínání povrchově upravených plechů

Nevýhody:

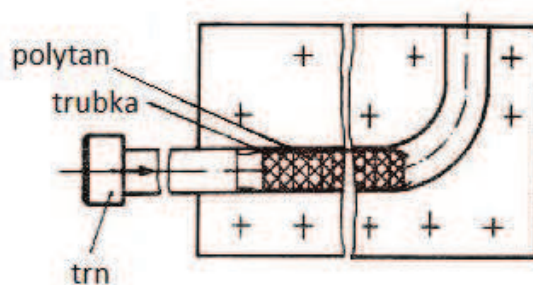
- manipulace s formou snižuje produktivitu práce
- malá životnost polyuretanu
- jen pro tenkostěnné trubky



Obr. 3.27 Zkušební nástroj [14]

3.2.5 Protlačování trubek [8,18]

V případě ohýbání krátkých tenkostěnných trubek na velmi ostré úhly je vhodná metoda protlačování trubky pomocí polytanové výplně podle obr. 3.28. Ohyb se provádí za studena. Princip je takový, že pevný trn tlačí pouze na polytanové kroužky, které rozpěchuje a pomocí třecích sil je trubka polytanem vtlačena do dělené zápusťky, která má tvar ohnuté trubky.



Obr. 3.28 Protlačování trubek [8]

Výhody:

- ohnutí na jeden průchod
- možnost ohýbat do ostrého úhlu
- nehrozí defekty ohybu trubek
- levný materiál nástroje
- dochází ke kalibraci trubky

Nevýhody:

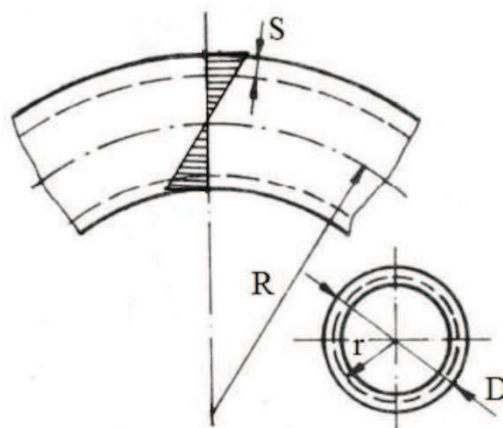
- opotřebení polytanu
- jen pro malé tloušťky
- velké síly na přetvoření
- jen pro tenkostěnné krátké trubky

Metoda se používá pouze pro tenkostěnné trubky, kde je velké nebezpečí vzniku zploštění, ztenčení a zvlnění stěny trubky. Těmto vadám je zamezeno díky napěchování stěny vlivem tlaku rozpěchovaného polytanu na stěnu.

3.3 Další využití elastomeru [3,8,12,15,18,21,23]

Elastomer má ve strojírenství uplatnění nejen jako tvářecí médium, ale také jako pomůcka při ohýbání tenkostěnných trubek. Tvoří i důležité součásti strojů, jako jsou těsnění, pružiny a tlumiče kmitů (silentbloky).

Ohýbání tenkostěnných trubek je v současné době velmi žádaná technologie z důvodu uplatnění v odlehčených konstrukcích nebo potrubních vedeních. Na obr. 3.29 je znázorněna geometrie a napětí trubky při ohybu. Aby nedošlo při ohýbání ke vzniku výraznějších defektů, je nutné dodržet určité technologické zásady, zejména poměr s/D a $R_{\min}$. Optimální podmínky technologie ohybu trubek jsou $s/D \geq 0,1$ a $R_{\min}/D \geq 3$, kde s je výchozí tloušťka trubky, D je vnější průměr ohýbané trubky a $R_{\min}$ je minimální poloměr ohybu. Při nedodržení může dojít ke značnému ztenčení stěny trubky v oblasti vnějšího poloměru ohybu, ke vzniku trhlin, ke zploštění kruhového průřezu, nebo ke zvlnění stěny v oblasti vnitřního poloměru ohybu. Tyto defekty lze zmírnit použitím různých výplní, díky kterým dojde ke stabilizaci kruhového průřezu a lze provádět ohýbání do ostřejších úhlů. Výplně mohou být tuhé, tekuté, mechanické, sypké a elastické. V případě elastických výplní se používá polyuretanový trn, který může mít různé tvary. Polyuretanový trn je vhodný pro kusové a malosériové ohýbání. V případě, že ohyb za studena není možný, lze provádět ohyb



Obr. 3.29 Geometrie ohybu trubky [8]

s ohřevem pomocí kyslíko-acetylenového plamene v místě ohybu. Dutina trubky se v tomto případě plní suchým sklářským pískem.

K těsnění nepohyblivých (víka, příruby, šroubení) i pohyblivých (písty, pístnice) částí strojů se používají pryžové O-kroužky. Jde o jednoduché prvky sloužící k oboustrannému těsnění kapalin a plynů, v případě pohyblivých částí, u hydraulických či pneumatických zařízení. Nevýhodou jsou malé dovolené rychlosti. U posuvu pístu by neměla být rychlost vyšší než 0,3 m/s. Pryž je vhodná pro těsnění benzínu, nafty, petroleje, minerálních olejů, tuků, stlačeného vzduchu, propan butanu a dalších. Tvrdosti kroužků se vyrábí v rozmezí od 50 do 90 ShA, pracovní teploty jsou od -55 do +180°C a maximální tlak až 16 MPa.

V hydraulických a pneumatických systémech slouží k těsnění přímočarého pohybu také manžety. Manžety se dělí na nevrstvené (pouze pryžové) a vrstvené (pryže s textilní vložkou). Symetrické manžety lze použít k utěsnění pístů i pístnic. Asymetrické manžety jsou určeny k utěsnění buď pístu nebo pístnice, v závislosti na provedení těsnících břitů.

Hřídelové těsnící kroužky neboli gufera (obr. 3.30), jsou prvky zhotovené spojením pryže a kovu. Jsou určeny pro těsnění otáčejících se hřídelů a dalších strojních součástí. Vyznačují se vysokou životností a jsou vhodné pro vysoké otáčky. Na pryži jsou kladeny velké nároky. Mezi nejdůležitější požadavky patří chemická odolnost proti těsnícím kapalinám, odolnost proti zvýšeným a nízkým teplotám, odolnost proti opotřebení, vhodné dynamické vlastnosti a malá změna mechanických vlastností vlivem teploty a času. Rozsah teplot může být od -50 do +130°C a maximální otáčky hřídele až 10 000 ot./min.



Obr. 3.30 Ukázka gufera [21]

Elastomer lze využít také jako pryžové pružiny a tlumiče kmitů neboli silentbloky. Silentbloky jsou určeny k pružnému uložení, tlumení rázů, aktivní i pasivní izolaci kmitů, hlukové izolaci, přenosu sil a podobně. Používají se například k pružnému uložení některých součástí podvozků anebo k uložení motoru do karoserie automobilu. Nacházejí se nejen v automobilech a motocyklech, ale i v letadlech, obráběcích strojích, stavebních a zemědělských strojích. Pro výrobu silentbloků se používá elastická směs o tvrdosti 50 až 80 ShA. Vyšší tvrdosti se používají pro podvozky sportovních automobilů. Kromě obyčejných pryžových silentbloků (obr. 3.31) existují také sofistikovanější silentbloky z trvanlivějšího polyuretanu, který je tvrdší, má větší tuhost a je tedy vhodný u sportovně laděných automobilů (obr. 3.32).



Obr. 3.31 Jednoduché silentbloky [23]



Obr. 3.32 Automobilové silentbloky [3]

4 ZÁVĚR

Při kusové nebo malosériové výrobě se s výhodou levného nástroje používá technologie tváření elastomery, které má široké uplatnění téměř ve všech typech plošného tváření. Základem je elastická část nástroje, která nahrazuje konvenční kovovou část. Jako elastomer se zpravidla používají materiály, jako jsou pryž nebo polyuretan, které jsou vyráběny v různých rozměrech, velikostech a tvrdostech. Tento způsob tváření se používá v různých průmyslových odvětvích a to především v automobilovém a leteckém průmyslu.

Výhodou elastomeru je nízká cena a jednoduchá výroba. Díky levné výrobě, přináší výhody v oblasti ekonomiky. Oproti jiným materiálům má však velmi složité deformační chování, které je ovlivněno mnoha faktory. Největší nevýhodou elastomeru je malá životnost oproti konvenčnímu nástroji. Deformace a tečení materiálu znemožňuje tvářet tlustší plechy, na které je zapotřebí velká síla. Chování závisí na tvaru, objemu, mechanických vlastnostech a dalších vnějších podmínkách. Všechny tyto faktory se musí brát v úvahu při výpočtech modulů pružnosti a tvářecích sil. Celková tvářecí síla je oproti konvenčním metodám větší o sílu nutnou k přetvoření elastomeru.

Metody tváření elastomery jsou rozděleny podle konstrukce nástroje na otevřené (ohýbání, zakružování) a uzavřené (Guerin, Marform, Maslenikov, radiální vypínání, protlačování).

Výhodou metod tváření elastomery je použití většinou jednočinných lisů a malé nároky na přesnost strojů. Další výhody jsou univerzálnost elastického nástroje, šetrnost k povrchově upraveným výrobkům, výhodné rozložení tlaku na obrobek a ve spoustě případů také možnost tvářet rozměrnější výrobky. Nevýhodou těchto metod je velká celková tvářecí síla, která musí být větší kvůli energeticky náročnému přetvoření elastomeru, kdy je nutnost použít výkonnější lis. Při použití elastického nástroje ke stříhání, jsou okraje výstřižku méně kvalitní než při stříhání pevným nástrojem, z důvodu utržení okrajů. V takovém případě je potřeba uvažovat přídavky na obrobení. Metody nejsou vhodné do velkosériové výroby, z důvodu nízké produktivity oproti konvenčním technologiím.

Elastomery se využívají díky svým vlastnostem nejenom k tváření polotovarů, ale také jako důležité součásti strojů. Výborné těsnící vlastnosti se využívají k těsnění pohyblivých i nepohyblivých uložení. Elastické vlastnosti jsou vhodné pro výrobu pružin a silentbloků.

Díky nízkým nákladům na výrobu součástek bude tváření elastomerem ještě spoustu let žádanou technologií tváření, při malosériové výrobě a výrobě prototypů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Amazon. *Industrial and Scientific* [online]. 1996-2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.amazon.com/.../dp/B00426CGU0>>.
2. Answers. *Sheet-metal forming* [online]. 2013 [cit. 2013-04-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.answers.com/topic/sheet-metal-forming>>.
3. AutoPROFITEAM. *Podvozkové centrum* [online]. 2004 [cit. 2013-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.autoprofiteam.cz/article.php?artid=550>>.
4. Beckwood. *Find a Hydraulic Press* [online]. 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupný z WWW: <http://www.beckwoodpress.com/press/hpd/model_434/>.
5. DIANI J., FAVOLLE B., GILORMINI P. A review on the Mullins effect. *European Polymer Journal*. Elsevier, 2009, s. 601-612.
6. DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití* [online]. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, 280 s. [cit. 2013-04-28]. ISBN 80-7080-617-6. Dostupné z WWW: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-img/001.html>.
7. DVOŘÁK, Milan, a kolektiv. *Technologie II*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004. 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
8. DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
9. Jini Polymech Engineering. *Products* [online]. 2011 [cit. 2013-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.jinipolymech.com/products/polyurethane-rollers-wheels-tyers/>>.
10. GORE s.r.o. *Elastomery - Desky a profily IBROFLEX® a FIBROELAST®* [online]. 2013 [cit. 2013-04-28]. Dostupný z WWW: <http://www.gore.cz/Katalog/2010/G_Elastomery.pdf>.
11. HOLUB, Josef. *Přez jako konstrukční materiál*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967. 268 s. Redakce chemické literatury. DT 678.4:621.
12. K&F Technická guma. *Technická guma* [online]. 2005-2013 [cit. 2013-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.guma.cz/>>.
13. Loewy 6500 ton hydraulic marform press, model h [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.interchangeablecomponents.com/.../Loewy-6500-ton-hydraulic-marform-press-model-h.HTML>>.
14. Nástroj pro radiální vypínání tenkostěnných trubek [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/.../nastroj_pro_radialni_vypinani_tenkostennych_trubek.pdf>.

15. Odbor technologie tváření kovů a plastů. *Studijní opory* [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_tvareni/kapitola_4.htm>.
16. PETRUŽELKA, Jiří. *Nekonvenční metody tváření* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2013-04-28]. 179 s. Dostupný z WWW: <<http://www.345.vsb.cz/.../Nekonvencni%20metody%20tvareni%202007.pdf>>.
17. PETRUŽELKA, Jiří, BŘEZINA, Richard. *Úvod do tváření II* [online]. Ostrava, 2001 [cit. 2013-04-28]. 115 s. Dostupný z WWW: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruselka/Texty/Uvod_TV2.pdf>.
18. PODANÝ, Kamil. *Problematika tváření elastomery*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. 53 s.
19. Polymery: Polymery, historie, využití, příprava, struktura [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupný z WWW: <http://vyuka.z-moravec.net/.../___chemie/1-01polymery.pdf>.
20. Polyurethane Products. *Smart Pad Systems* [online]. 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://polyprod.com/radius-tooling/smartpad.html>>.
21. Rubena. *Katalogy* [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.rubena.cz/>>.
22. SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření: Část I*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2010, 134 s. ISBN 978-80-214-4220-7.
23. T.E.A. TECHNIK s.r.o. *Přehled produktů* [online]. 2007 [cit. 2013-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.teatechnik.cz/tlumici-pryze/>>.
24. THIRUVARUDCHELVAN S. Elastomers in metal forming: A review. *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier, 1993, s. 55-82.
25. THIRUVARUDCHELVAN S., TAN M. J. Investigations into collar drawing using urethane pads. *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier, 2007, s. 87-91.
26. Weldlogic inc. *Tube Rolling Machines* [online]. 1978-2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://weldlogic.com/TRM.php>>.
27. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Thermoplastisch elastomeer* [online]. c2013 [cit. 28. 04. 2013]. Dostupný z WWW: <http://nl.wikipedia.org/wiki/Thermoplastisch_elastomeer>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Popis	Jednotka
d	Průměr otvoru	[mm]
D	Vnější průměr	[mm]
E	Modul pružnosti	[MPa]
f	Součinitel tření	[-]
F	Zatěžující síla	[N]
F _c	Celková tvářecí síla	[N]
F _E	Síla nutná k přetvoření elastomeru	[N]
F _{tř}	Síla nutná k překonání třecích odporů	[N]
F _{tv}	Síla potřebná pro vlastní tváření	[N]
h	Výška lemu	[mm]
h _{min}	Minimální výška lemu	[mm]
h ₀	Počáteční výška vzorku	[mm]
Δh	Změna původní výšky	[mm]
Δh _L	Hloubka ponoření ohybníku	[mm]
K _T	Tvarový součinitel	[-]
q	Celkový tvářecí tlak	[MPa]
r ₂	Poloměr lemu	[mm]
r _{2min}	Minimální poloměr lemu	[mm]
r _L	Poloměr zaoblení čela	[mm]
R	Poloměr ohybu	[mm]
R _{min}	Minimální poloměr ohybu	[mm]
R _p	Poloměr okraje před lemováním	[mm]
R _v	Poloměr okraje po lemování	[mm]
s	Tloušťka materiálu	[mm]
s ₀	Tloušťka tvářeného polotovaru	[mm]
S	Tvářená plocha polotovaru	[mm ²]
S _e	Plocha deformovaného průřezu	[mm ²]
S _L	Průřezová plocha lisovníku	[mm ²]
S _p	Velikost průřezu	[mm ²]
t	Lemovaná tloušťka plechu	[mm]
α'	Úhel sklonu spojnice	[°]
α _{od}	Zohledňuje odpory elastomeru v důsledku jeho přemísťování	[-]
β _e	Koeficient zpevnění	[-]
γ _L	Zohledňuje vliv půdorysného tvaru lisovníku	[-]
ε	Poměrná deformace	[-]
λ	Deformační činitel	[-]
σ	Napětí materiálu	[MPa]
τ _s	Mez pevnosti ve smyku	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ukázka výrobků vyrobených tvářením elastomery	9
Obr. 2 Ukázka elastomerů	9
Obr. 1.1 Elastomer ve tvaru válečku	10
Obr. 1.2 Elastomer ve tvaru hranolů	10
Obr. 2.1 Stavba elastomeru	11
Obr. 2.2 Termomechanická křivka polymeru	11
Obr. 2.3 Výrobky zhotovené kombinací polyuretanu a kovu	12
Obr. 2.4 Tahový diagram	13
Obr. 2.5 Charakter tvářecí síly	14
Obr. 2.6 Schéma nástroje	14
Obr. 2.7 Rozložení tlaku elastomeru v pouzdře	15
Obr. 2.8 Diagram experimentálního zatěžování	16
Obr. 3.1 Ohyb do tvaru V s deskou proti opotřebení	17
Obr. 3.2 Ohyb do tvaru U s rovným dnem	18
Obr. 3.3 Ohyb do tvaru U s oblým dnem	18
Obr. 3.4 Podložení pevnou deskou	18
Obr. 3.5 Konvenční nástroj	19
Obr. 3.6 Elastomerový nástroj	19
Obr. 3.7 Ukázka SMP1240	20
Obr. 3.8 SMP1240 Smart Pad System	20
Obr. 3.9 Dvouválcová zakružovačka	20
Obr. 3.10 H.D.H. 2 Roll Mandrel Support Arm	21
Obr. 3.11 Uzavřený nástroj	21
Obr. 3.12 Metoda Guerin	22
Obr. 3.13 Stříhání metodou Guerin	22
Obr. 3.14 Stříhání otvoru	22
Obr. 3.15 Geometrie lemů	23
Obr. 3.16 Beckwood 810	25
Obr. 3.17 Výrobek metodou Guerin	25
Obr. 3.18 Metoda Marform	25
Obr. 3.19 Loewy 6500	27
Obr. 3.20 Výrobek metodou Marform	27
Obr. 3.21 Metoda Maslenikov	27
Obr. 3.22 Ukázka tažení	28
Obr. 3.23 Nástroj bez tažníku	28
Obr. 3.24 Metoda Maslenikov s kovovým razníkem	28
Obr. 3.25 Konvenční radiální vypínání	29
Obr. 3.26 Radiální vypínání elastomerem	30
Obr. 3.27 Zkušební nástroj	30
Obr. 3.28 Protlačování trubek	31
Obr. 3.29 Geometrie ohybu trubky	31
Obr. 3.30 Ukázka gufera	32
Obr. 3.31 Jednoduché silentbloky	32
Obr. 3.32 Automobilové silentbloky	32

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Parametry ohýbání otevřeným nástrojem	19
Tab. 3.2 Parametry metody Guerin	24
Tab. 3.3 Parametry metody Marform	26