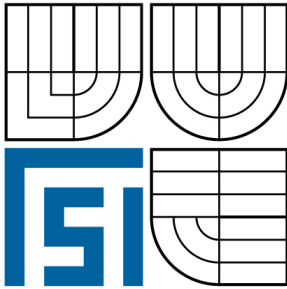


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VYUŽÍVAJÍCÍ KAPALINY JAKO TVÁŘECÍHO MÉDIA

THE USE OF FLUID MEDIUM IN FORMING TECHNOLOGIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN TŮMA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. EVA ŠMEHLÍKOVÁ

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2007/08

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tůma Martin

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:

Technologie využívající kapaliny jako tvářecího média

v anglickém jazyce:

The use of fluid medium in forming technologies

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o vytvoření přehledu moderních a speciálních technologií využívajících pro výrobu různých součástí kapalinu jako nepevného tvářecího nástroje. Dále zde budou uvedeny příklady součástí a jejich užití v praxi spolu s popisem metody, která je pro jejich výrobu nejvhodnější. Výhody a nevýhody těchto metod ve srovnání s konvenčními metodami tváření.

Cíle bakalářské práce:

Provedení průzkumu výrobních metod využívajících kapalinu jako tvářecího média a zhodnocení míry jejich využití v současné době. Vytvoření přehledu všech metod, které pro výrobu součástí využívají kapalinu.

Seznam odborné literatury:

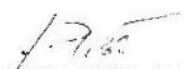
1. ROMANOVSKIJ, Viktor Petrovič. Příručka pro lisování za studena. 2. vyd. Praha: SNTL, 1959. 540 s. DT 621.986.
2. DVORÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
3. TIŠNOVSKÝ, Miroslav, MÁDLE, Luděk. Hluboké tažení plechu na lisech. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. 200 s. ISBN 80-03-00221-4.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Šmehlíková

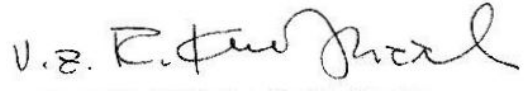
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 19.11.2007

L.S.



doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

TŮMA Martin: Technologie využívající kapaliny jako tvářecího média.

Cílem této práce je provedení průzkumu výrobních metod využívajících kapaliny jako tvářecího média a zhodnocení míry jejich využití v současné době. Vytvoření přehledu všech metod, které pro výrobu součástí využívají kapalinu. Dále jsou zde uvedeny příklady součástí využitých v praxi, metoda užitá při jejich výrobě a porovnání výhod a nevýhod oproti konvenčním metodám.

Klíčová slova: Tváření kapalinou, hydroform, hydromechanické tažení, wheelon, asea, vysokorychlostní tváření

ABSTRACT

TŮMA Martin: The use of fluid medium in forming technologies.

The aim of this work is recognition manufacturing methods making use liquid like forming media and estimation measurement their usage in present. Making summary of all methods, which make use liquid for manufacturing components. Further are here introduced examples of parts, which are used in practice, method used at their manufacturing and comparing advantages and handicap in comparison with conventional methods.

Keywords: Hydroforming, fluidforming, wheelon, asea, explosive forming

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TŮMA Martin: *Technologie využívající kapaliny jako tvářecího média*. Brno, 2008. 35 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Šmehlíková. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 5.5.2008

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí bakalářské práce Ing. Evě Šmehlíkové za podporu, obětavou pomoc a cenné připomínky a rady při zpracování práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Str.

1. Úvod	9
2. Speciální metody tváření	10
2.1 Metoda HYDROFORM	10
2.1.1 Princip metody	10
2.1.2 Užití metody	11
2.1.3 Stroje pro metodu hydroform	13
2.2 Stranové vypínání symetrických a nesymetrických součástí	14
2.2.1 Rozšiřování trubek	14
2.2.2 Výroba trubkových tvarovek typu T	14
2.2.3 Další způsoby tvarování dutých součástí	16
2.3 Metoda WHEELON	18
2.4 Metoda ASEA	19
2.5 Hydromechanické tažení (HMT)	20
2.5.1 Princip hydromechanického tažení	20
2.5.2 Funkce tlakové kapaliny	21
2.5.3 Tlakové a geometrické parametry při tažení válcového výtažku	22
2.5.4 Vybrané materiály vhodné k hydromechanickému tažení	23
2.5.5 Varianty hydromechanického tažení	24
2.5.6 Konstrukce nástroje	27
2.5.7 Stroje pro hydromechanické tažení	30
2.6 Vysokorychlostní tváření	31
2.6.1 Princip metody	31
2.6.2 Historie	32
2.6.3 Využití metody	32
3. Závěr	33
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých zkratk a symbolů	

1. Úvod

Výroba některých součástí konvenčními způsoby tváření bývá mnohdy finančně náročná a technologicky komplikovaná. Proto postupem času vznikly nekonvenční metody tváření, při nichž se snižují náklady na výrobu nástrojů (negativního tvaru tažnice), snižuje se počet tažných operací a odpadá nutnost zařazení mezioperačního žíhání. Za nekonvenční metody tváření považujeme ty metody, které využívají silového působení pružného nebo kapalného prostředí. To s sebou samozřejmě přináší mnoho výhod, ale i řadu úskalí, která budou blíže popsány spolu s jednotlivými metodami na následujících stranách. Na obr. 1 jsou uvedeny příklady složitých výtažků zhotovených nekonvenčními metodami.



Obr. 1 Ukázka produktů nekonvenčního tváření [12]

2. SPECIÁLNÍ METODY TVÁŘENÍ [6]

V dnešní době existuje celá řada speciálních metod tváření. Využívají se převážně ve velkosériové výrobě. Tyto metody se rozdělují dle:

rychlosti – na vysokorychlostní tváření (výbuchem, nastřelování a renovace dutin, uzavřené zápusťkové kování, explozivní tváření, stříhání)

frekvence - na frekvenční tváření ultrazvukem (tažení trubek přes průvlak s využitím trnu aktivovaným ultrazvukem při frekvenci $f > 16$ kHz)

teploty - na tváření za poloohřevu (pod teplotou rekrystalizace)
- na tváření za vyšších teplot (nad teplotou rekrystalizace)
- na tváření z tekuté fáze (nad teplotou solidu)

směru působení – na jednosměrné a vícesměrné tváření (vícečinné lisy, vícesměrné kování)

tření – s aktivními silami tření (jednoduché tažení ocelového plechu s pryžovým přidržovačem)

polotovaru – na tváření při výrobě sdružených materiálů (lisování v přípravku s vakuem, válcování v ochranné atmosféře, explozivní lisování)

využití el. mag. indukce – elektromagnetické a magnetoimpulsní tváření

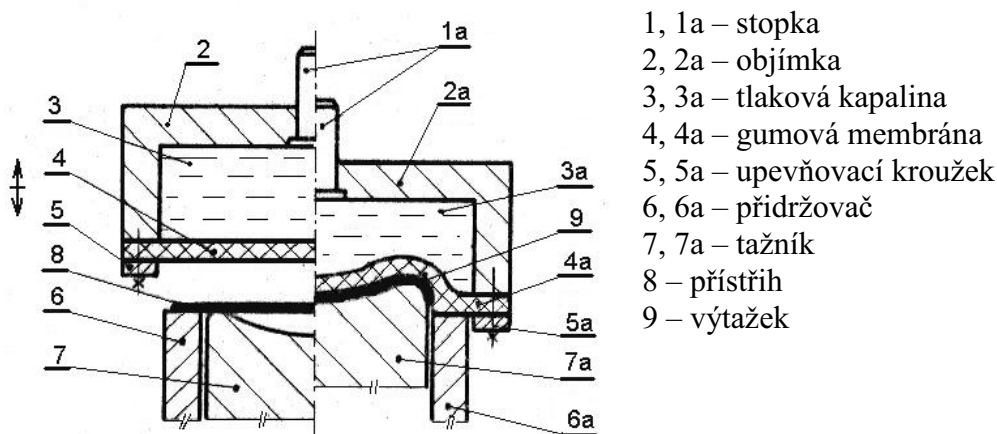
tlaku - na tváření pomocí elastického média (stříhání, děrování, tažení)
- na tváření pomocí kapalného média (hydroform, stranové vypínání symetrických a nesymetrických součástí, wheelon, asea, hydromechanické tažení)

Právě metodami využívající kapaliny jako tvářecího média se zabývá předložená bakalářská práce.

2.1 Metoda hydroform [4], [5], [9], [11], [17]

2.1.1 Princip metody

Tažení je uskutečňováno pomocí kapaliny uzavřené v prostoru mezi membránou a objímkou. Tlak kapaliny je regulován a v podstatě nahrazuje tažnici při konvenčním způsobu tažení. Tažník má vnitřní tvar budoucího výtažku. Princip tažení je patrný z obrázku 2, kde je v levé části znázorněna výchozí poloha a v pravé části poloha po tažení. Do „otevřeného“ nástroje se vloží přístřih a vzájemným posuvem tažníku i horní pohyblivé části nástroje je postupně tvarován.



Obr. 2 Schéma nástroje pro metodu hydroform [5]

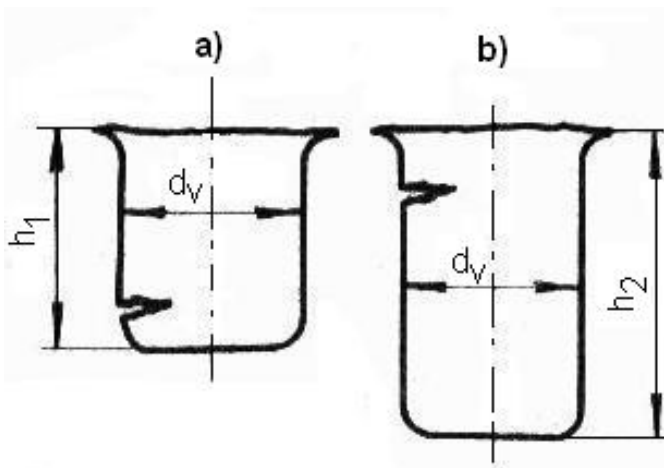
Tlak kapaliny nejprve vyvolává ohýbání plechu na zaoblených hranách tažníku, dále postupně tvaruje plášť výtažku, který se „nabaluje“ a pevně přitlačuje na povrch tažníku. Při optimálních podmínkách zabráňuje zvlnění výtažku a vyvolává příslušnou přitlačnou sílu. Tlak postupně vzrůstá z určité počáteční hodnoty. Velikost tlaku a jeho postupný nárůst závisí na kvalitě a tloušťce plechu, přetvárném odporu v daných podmínkách, tvaru výtažku a hloubce tažení.

Membrána je zhotovená z pryže, přibližně 30mm silná, uzavírá tlakový prostor a je v přímém styku s taženým přístřihem. Životnost membrány se udává přibližně 5000 až 10000 výtažků. Zvýšení životnosti je možno dosáhnout speciálními povlaky.

Stupeň tažení

Bývá omezen tvorbou trhlin ve stěně výtažku, dosahuje však vyšších hodnot než u konvenčních metod. Toho je dosaženo odlišnými podmínkami:

a) Při konvenčním tažení vznikne trhlina v přechodu mezi zaoblením dna a pláště (obr. 3a). Příčinou je působící tahové napětí, jehož hodnota přesáhne mez pevnosti plechu v těchto místech.



b) Při tažení metodou hydroform vyvozený tlak kapaliny přitlačuje plášť výtažku na povrch tažníku, tím vzniká tření a plech se tak výrazně nezeslabuje vlivem působícího tahového napětí a nedojde v těchto místech k protržení. Působení tahového napětí se však projeví v místech, kde je určitá nepřidržená plocha, a to zejména v zaoblení mezi přírubou a pláštěm. Ke vzniku trhliny tedy dojde v těchto místech (obr. 3b).

Obr. 3 Vznik trhliny ve stěně výtažku [5]

Tažná síla

Celková tažná síla je složena ze síly na vlastní tažení (přibližně stejné jako u konvenčního tažení) a ze síly potřebné k překonání protitlaku. Tento protitlak však může být i několikrát vyšší než vlastní tažná síla. Tato skutečnost má vliv na volbu lisu.

Tloušťka stěny výtažku

V porovnání z konvenčními způsoby tažení je průběh ztenčení stěny výtažku výhodnější a rovnoměrnější. Průměrné zeslabení je asi 10%.

2.1.2 Užití metody

- vhodná pro náročnější tvary výtažků (kužel, paraboloid, půlkulové plochy, stupňovité tvary, atd.). Méně vhodná je tato metoda pro hluboké tažení, mohou zde vzniknout vlny na rohových zaobleních
- jednoduché tažné nástroje (není potřeba vlastní tažnice), tažník může být zhotoven z méně kvalitních materiálů

- nutnost použití tlakové objímky, rozvodu kapaliny a dalšího příslušenství u konvenčních lisů
- tloušťka tažených plechů od 0,2mm do 10mm, přičemž tloušťka tažených plechů se výrazně nemění
- vhodná v malosériové výrobě, ve velkosériové výrobě při použití speciálních lisů
- jistou odvozeninou může být metoda FLUID-FORM, kde systém pracuje s konstantní olejovou náplní. Výhodou tohoto systému je možnost pracovat s tlaky až 200MPa.

V následující galerii obr. 4 jsou ukázány příklady produktů metody hydroform převážně zahraničních firem. Nejčastěji se jedná o výtažky s nepravidelným, případně kuželovitým tvarem, ale také o celé části karoserií automobilů.



Obr. 4 Příklady dílců zhotovených metodou hydroform [4],[9],[17]

2.1.3 Stroje pro metodu hydroform

Je možné použít jednočinných i dvoučinných hydraulických lisů, které jsou vybaveny speciálními nástroji a příslušenstvím. Dále se využívají pro tuto metodu již zkonstruované speciální lisy.



Hydraulický hydroforming lis HF

Lis s krátkým zdvihem pro metodu hydroforming. Vhodný pro dlouhé části, jež vyžadují malou odchylku a vysokou stabilitu rámu, stolu a nástroje. Může být 1,2 nebo 3 modulový (obr. 5).

Rozsah uzavírací síly na jeden modul:

30 000 – 60 000 kN

Rozsah rozměru stolu: 1 600 – 3 000 mm

Rozsah tlaku: 250 – 400 MPa

Obr. 5 Hydraulický lis HF [11]



Hydraulický hydroforming lis ZHF

Lis s dlouhým zdvihem a prisma vedením beranu. Může být použit v kombinaci s vysokotlakým systémem (HPS) pro tváření kompletních aplikací (obr. 6).

Rozsah uzavírací síly: 4 000 – 50 000 kN

Rozsah rozměru stolu: 1 600 – 3 600 mm

Rozsah tlaku: 250 – 400 MPa

Obr. 6 Hydraulický lis ZHF [11]

Výrobce výše uvedených lisů je švédská firma AP&T – automation presses and tooling. Dodavatelem pro ČR je firma Intech spol s.r.o.

2.2 Stranové vypínání symetrických a nesymetrických součástí [2], [3], [7]

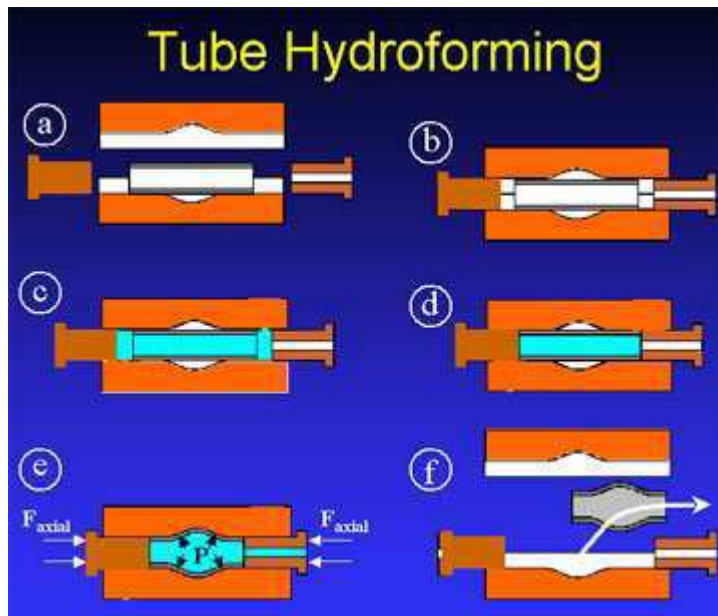
Duté tenkostěnné součásti lze vyrábět z plechů nebo trubek klasickým tažením nebo nekonvenčními metodami tváření.

Tváření kapalinou má následující výhody:

- nižší náklady na nástroje
- rovnoměrné rozložení tlaku na polotovary a tedy rovnoměrnější tloušťky stěny
- možnost vyrábět tvarově složité dílce
- bezproblémové odstranění výlisku z nástroje

2.2.1 Rozšiřování trubek

Rozšiřování trubek se provádí pomocí kapaliny s vnitřním, předem stanoveným tlakem. Zjednodušený přehled procesu je znázorněn na obr. 7. Trubka jako polotovar se vloží do spodní části formy (a), poté se přiklopí vrchní část a celý systém se uzavře (b). Otvory se utěsní těsnicími kroužky a forma se naplní kapalinou (c). Narůstá tlakové napětí v součásti (d). Těsnicí kroužky tlačí trubku do dutiny, vnitřní přetlak dosáhne maximální hodnoty a součást zaujme tvar formy (e). Nakonec se vypustí kapalina, forma se rozebere a hotový výtazek je vyjmut z formy (f).

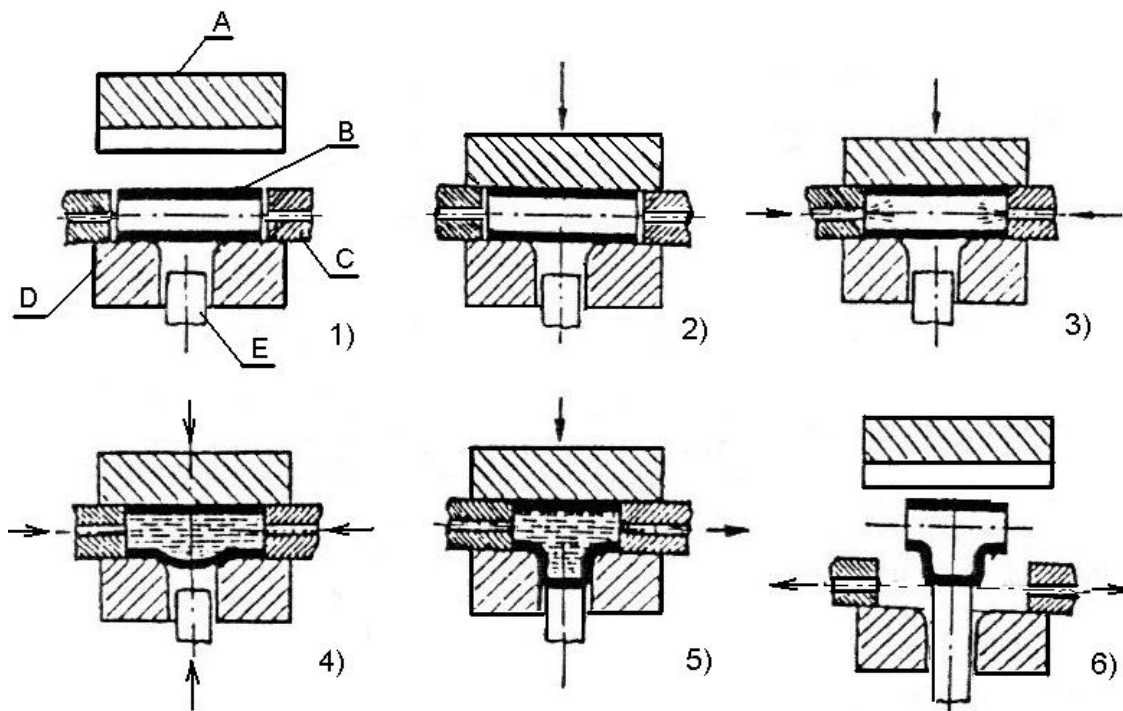


Obr. 7 Rozšiřování trubek kapalinou [2]

2.2.2 Výroba trubkových tvarovek typu T

Při konvenčních způsobech výroby daných součástí je zapotřebí kombinace více technologií, např. odlévání, volné kování a obrábění, zápustkové kování a obrábění, svařování, kombinace tváření, svařování a obrábění.

Tyto kombinace technologií lze nahradit nekonvenčním způsobem tváření tvarovek z trubkových polotovarů tlakem kapaliny 20 až 300 MPa s osovým stlačováním. To s sebou přináší i nezanedbatelnou část úspor, konkrétně na materiálu 50 až 85% a na pracnosti 80 až 95%.



Obr. 8 Postup výroby T tvarovek [7]

Na obr. 8 je znázorněn postup při výrobě tvarovek typu T. Výchozí polotovar (trubka) je vložen do spodního dílu nástroje, jehož dutina má tvar hotového T-kusu (1). Poté je trubka sevřena horním dílem (2). V další fázi (3) je trubka naplněna kapalinou a osově stlačována dvěma proti sobě působícími lisovnicí. Tlakem kapaliny při současném osovém stlačování dochází k tečení materiálu do dutiny nástroje a vytváření požadovaného T kusu (4). Osové stlačování může být doplněno brzděním odbočky, aby nedošlo k protržení dna (5). Po otevření formy je tvarovka vyjmuta pomocí vyhazovacího trnu (6).

Výpočtové vztahy [7]

Autoři [7] pro výpočet počátečního a maximálního tlaku a pro výpočet hlavní deformační síly uvádějí následující vztahy:

Počáteční a maximální tlak

$$p_{\min} = \frac{2 \cdot s_0 \cdot R_m}{d_0 - s_0} [\text{MPa}] \quad (2.1)$$

$$p_{\max} \leq \frac{2 \cdot s \cdot R_m}{R} [\text{MPa}] \quad (2.2)$$

kde R_m – mez pevnosti trubky [MPa]
 d_0 – vnější průměr trubky [mm]
 s_0 – počáteční tloušťka trubky
 s – tloušťka stěny trubky po tváření ($s \sim s_0$)
 R – vnitřní poloměr vyboulené části

Hlavní axiální deformační síla F_a [N], jejíž velikost je rozhodující pro volbu tvářecího nástroje

$$F_a = 1,3 \cdot \left[p_{\max} \cdot \frac{\pi \cdot (d_0 - s_0)^2}{4} + \pi \cdot (d_0 - s_0) \cdot R_e \cdot s_0 \right] \quad (2.3)$$

kde 1,3 – součinitel zohledňující zvýšení axiální síly třecími odpory

p_{\max} – maximální tlak kapaliny stanovený výpočtem [MPa]

d_0, s_0 – rozměry trubky [mm]

R_e – smluvní mez kluzu (materiálu trubky) [MPa]

2.2.3 Další způsoby tvarování dutých součástí

Na následujících obrázcích jsou ukázány výrobky firmy AMERICAN HYDROFORMERS INC., která se zabývá výrobou částí automobilů (topné soustavy, těla katalyzátorů, výfukové soustavy, atd.) a také vodovodních komponentů (obr. 9). Možnost vyrobít dílce rozličných tvarů dává designérům nový prostor pro návrhy vodovodních baterií a armatur.



Obr. 9 Ukázka vodovodních komponentů [2]

V levé části obr. 10 je vidět trubka, která byla v předchozí operaci naohýbána na CNC ohýbačce. Zde se kapaliny využívá jako výplně, která znemožňuje přílišnou deformaci průřezu trubky. V pravé části již vidíme trubku po vytvarování. Za povšimnutí stojí rozličné tvary a rozšíření, jaké trubka zaujme. Těchto tvarů bychom nebyli schopni dosáhnout konvenčními metodami.



Obr. 10 Ukázka dílce před a po tváření [2]

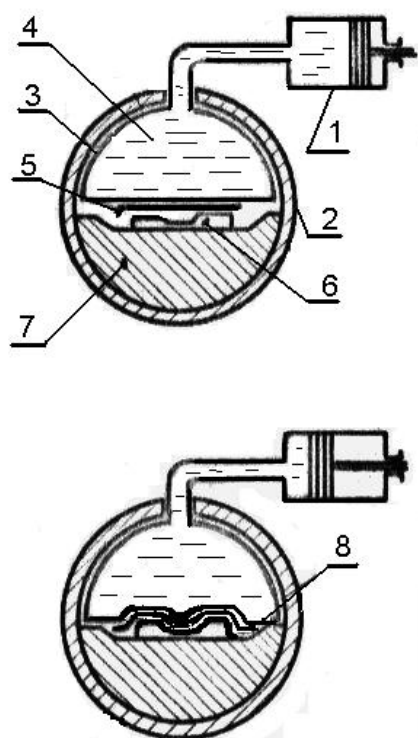
V ČR tuto technologii používá např. firma BOLTJES INTERNATIONAL spol. s r.o., která se zabývá ohýbáním a tváření trubek a trubkových systémů, zejména pro tepelnou techniku a automobilový průmysl. Její doménou je velko, středně i malosériová výroba z měděných, nerezových, ocelových a hliníkových trubek. Na obr. 11 jsou ukázány některé dílce vyráběné právě technologií stranového vypínání.



Obr. 11 Ukázka výrobků firmy Boltjes International spol. s r.o. [3]

Kromě výše uvedených metod existují i další metody tváření dutých součástí, u kterých výchozím polotovarem může být kromě trubek i předhotovené tažené nádoby. Jedná se např. o stranové vypínání, výrobu vlnovců, přechodek, žeber prolisů, nádob se složitým tvarem površky, tělesa přístrojů a hydraulických zařízení, součástí jízdních kol, dílce v automobilovém průmyslu atd. S úspěchem lze tvářet trubky měděné, hliníkové, mosazné, z uhlíkové a legované oceli.

2.3 Metoda WHEELON [5], [16]



Metoda wheelon je v podstatě tažení gumovým vakem, který je přitlačován tlakovou kapalinou. Měrné tlaky dosahují hodnot až $450\text{kPa}/\text{cm}^2$. Výhodou této metody je možnost lisovat několik výlisků najednou, rozlehlých výlisků, avšak mělkých.

Schématické znázornění metody wheelon je uvedeno na obr. 12. Zařízení se skládá z tlakového válce (1), objímky (2), gumového vaku (3), tlakové kapaliny (4), přístříhu (5), tažníku (6), základové desky (7) a samotného výtažku (8). V horní části obrázku je výchozí situace a ve spodní situace po tažení.

V České republice se používá většinou lisu značky Verson (obr.13). Je vybaven posuvným stolem a dvěma pracovními plochami. Toto uspořádání má výhodu v tom, že jedna sada výlisků se lisuje a druhá se může připravovat. Vlastní lisování trvá asi 4 minuty.

Obr. 12 Schéma metody WHEELON [5]



Metoda Wheelon



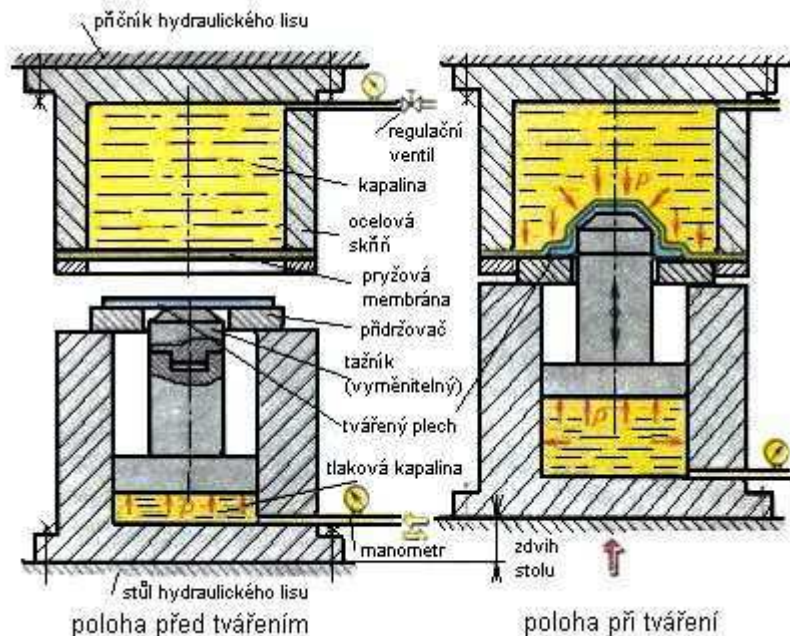
Obr. 13 Ukázka lisu Verson pro metodu Wheelon [16]

2.4 Metoda ASEA [16]

Výroba tvarově komplikovaných dílců (např. s vydutými nebo vypuklými lemy) s dokonalým povrchem vyžaduje použití takového lisu, který umožňuje kontrolu tlaku tažníku a zároveň kontrolu tlaku kapaliny v kontejneru, jenž plní funkci tažnice.

Tyto požadavky splňuje speciální hydraulický lis Quintus ASEA typické konstrukce švédské firmy ASEA. Zařízení se skládá z rámu ze dvou polokruhových příčniců a dvou sloupů ovitých dokola ocelovým drátem. Ten je položen v několika vrstvách s tahovým předpětím, čímž stahuje jako bandáž všechny díly v jeden celek. Lisy této konstrukce jsou lehčí, bezpečnější a mají větší únosnost než lisy konvenční konstrukce.

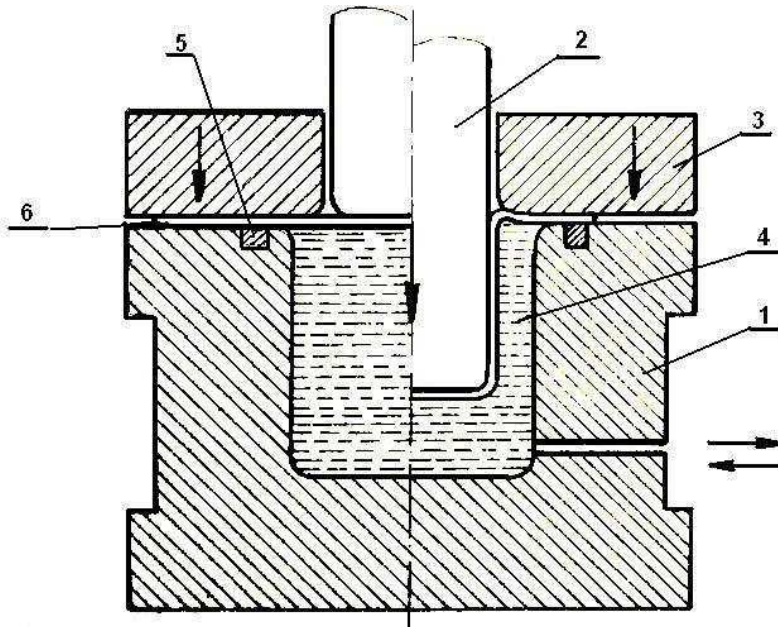
Na obr. 14 je uvedeno pracovní schéma daného lisu. Pracuje na principu kontroly zdvihu spodního stolu pohybujícího se směrem dolů a tím je řízena hodnota tlaku nad pístem spodního stolu. Tím dochází k postupnému obnažení tažníku. Řízení je zajištěno elektrohydraulickým rozvodem dle programu, který je dán diagramem závislosti tlaku na a zdvihu. Ten bývá vyhotoven z papíru, který se posouvá před fotobuňkami. Výhodou tohoto způsobu řízení je jistě to, že diagram lze přistříhnout podle toho, jak vychází rozměry a tvar zkušebních vzorků.



Obr. 14 Schématické znázornění lisu ASEA [16]

2.5 Hydromechanické tažení (HMT) [5], [7], [10], [11], [14], [15]

Hydromechanické tažení představuje technicky a ekonomicky nejzajímavější technologii hlubokého tažení s pracovní kapalinou. Touto technologií je možné zhotovovat hlubší duté nádoby z plechu, rotačního i nerotačního tvaru, zpravidla s přírubou.



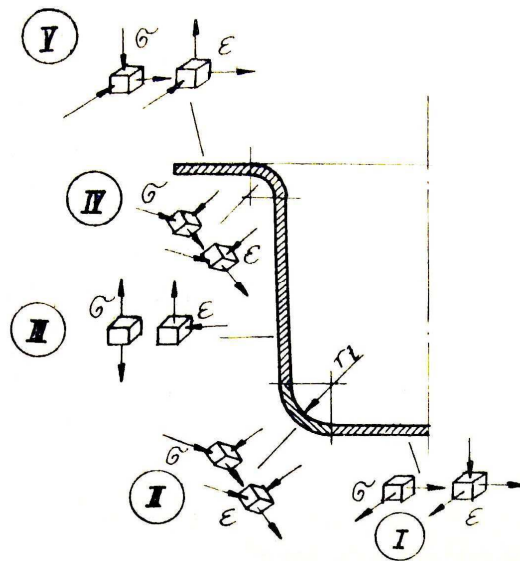
Obr. 15 Schématické znázornění nástroje pro HMT [15]

2.5.1 Princip hydromechanického tažení

Princip HMT je znázorněn na obr. 15. Hlavní částí nástroje je tažná komora (1) představující tažnici. Její vnitřní prostor, tažná dutina (4), je plněna z hydraulického obvodu nástroje sodnou vodní emulzí. V blízkosti tažné hrany je umístěna drážka s těsněním (5). Přístříh plechu (rondel, kruhovka) (6) je založen na základací rovinu, přičemž jeho spodní strana je ve styku s hladinou kapaliny v tažné komoře (1). Po dosednutí přídržovače (3), který je upnut na vnějším beranu lisu, dojde k uzavření a utěsnění soustavy. Dosednutím tažníku (2) na plech a jeho vniknutím do objemu kapaliny dojde v tažné komoře k prudkému nárůstu tlaku a tím k vlastnímu tvarování plechu jeho nabalováním na tažník (2), až je dosažen konečný tvar duté válcové součásti. Přebytná kapalina se z tažné komory vypouští pod nastaveným tlakem přes řídicí systém nástroje. Velikost tlaku se v průběhu tažení může měnit dle naprogramování. Nutnost regulace tlaku je nejvíce patrná při tažení tenkých plechů do tloušťky stěny výtažku 1mm, ale i při tažení kuželovitých, parabolických a dalších tvarů.

Dle [15] se vyskytuje při hlubokém tažení těchto pět oblastí (obr. 16):

- tahové vypínání a posouvání po čele tažníku (1)
- ohýbání a posouvání přes poloměr tažníku (2)
- tahové vypínání mezi tažnicí a tažníkem (3)
- ohýbání a posouvání přes poloměr tažnice (4)
- tažení mezi čelní plochou tažnice a přídržovače (5)



Obr. 16 Oblasti napětí a deformací na výtažku [15]

Výhody HMT:

- snížení počtu tažných operací
- snížení počtu mezižihacích operací
- kvalitní povrch výtažků
- velká přesnost výtažků
- minimální ztenčení výtažků v ohybu u dna

Nevýhody HMT:

- nutnost použití speciálních nástrojů a speciálních lisů CMT (výrobce ŽĐAS a.s.)

2.5.2 Funkce tlakové kapaliny

- při optimálním tlaku odstraňuje vliv nepřidržené plochy a tím zamezuje ztrátě stability v této oblasti, což je obzvláště výhodné u výtažků s tvarovým dnem
- téměř eliminuje vliv zaoblené hrany tažnice (vyboulení směrem nahoru u zaoblení tažnice). Tím se zmenší síla potřebná na přetváření příruby o hodnotu tření a ohybu na zaoblené hraně tažnice
- postupně „nabaluje“ přístřih na tvarový tažník, zároveň je menší hodnota ztenčení oproti konvenčnímu způsobu tažení a tím nevznikají nadměrná zeslabení, případně praskliny v plášti nebo dně výtažku
- jako nevýhodu je nutné uvést, že při hydromechanickém tažení je nutná větší celková tažná síla, kterou musíme vyvodit na tažníku, než u konvenčního tažení, protože musíme překonávat ještě navíc protitlak kapaliny. Proto také potřebujeme použít lisů s vyšší jmenovitou silou.

2.5.3 Tlakové a geometrické parametry při tažení válcového výtažku zhotoveného technologií HMT [7], [14]

Polotovarem je kruhový přístřih plechu, z kterého se zhotoví válcový výtažek tažením s přidržovačem do tažnice naplněné kapalinou (obr. 17)

Tlak kapaliny v tažné komoře (p_N)

- závisí na tloušťce a jakosti plechu, ale i na geometrickém tvaru výtažku, velikosti mezer z a z_1 . Pro válcový výtažek z hlubokotažného plechu tř. 11 se doporučuje:

$p_N = 25$ až 50 MPa tloušťka 1mm

$p_N = 35$ až 70 MPa tloušťka 2mm

V případě tažení plechu z nerezavějící oceli tř. 17 je p_N až o 100% vyšší.

Tažná síla (F_{ht})

- stanovuje se pro kontrolu vhodnosti lisu s ohledem na konkrétní tvar výtažku. Pro přibližné určení tažné síly pro hydromechanické tažení vyhovuje vztah:

$$F_{ht} = F_{kt} + p_N \cdot S \text{ [MN]} \quad (2.4)$$

kde F_{kt} – síla pro klasické tažení [MN]

p_N – tlak kapaliny v tažné komoře (v nástroji) [MPa]

S – plocha půdorysného průřezu výtažku [mm^2]

Přidržovací síla (F_p)

- je při HMT značně ovlivňována působením tlaku kapaliny. Pro ideální průběh procesu HMT se požaduje možnost plynulé změny přidržovací síly v závislosti na změnách tlaku kapaliny v komoře a na zmenšování plochy příruby. Tento požadavek je zvláště naléhavý při tažení kuželů. Pokud z technických důvodů nelze regulovat hodnotu přidržovací síly, stanoví se konstantní přidržovací tlak při HMT u válcových výtažků v rozmezí hodnot $p_p = 8$ až 12 MPa.

Tažná mezera mezi tažníkem a tažnicí (z)

- patří k nejvýznamnějším geometrickým parametrům při HMT, neboť je podmínkou pro optimální vytvoření „protivlny“ z tvářeného plechu v oblasti mezi tažníkem a přidržovačem. Doporučené hodnoty z pro válcový výtažek jsou:

$z = 4 - 6$ mm tl. 1 mm

$z = 8 - 14$ mm tl. 2 mm

Mezera mezi tažníkem a přidržovačem (z_1)

- spolupodílí se na vytvoření protivlny

$z_1 = 0,5 - 5$ mm tl. 1 mm

$z_1 = 0,5 - 14$ mm tl. 2 mm

Zaoblení přidržovače (R_1)

$R_1 = 1 - 3$ mm tl. 1 mm

$R_1 = 1 - 5$ mm tl. 2 mm

Zaoblení tažnice (tažné hrany) – (R)

- v důsledku vytvoření protivlny v průběhu tažení dochází k přímému styku taženého plechu s tažnou hranou většinou jen na začátku tažení.

R = 4 – 8 mm tl. 1 mm

R = 6 – 12 mm tl. 2 mm

Zaoblení tažníku (r)

- volí se s ohledem na tloušťku taženého plechu následovně

$r_{\min} = 3 \text{ mm}$ tl. 1 mm

$r_{\min} = 4 \text{ mm}$ tl. 2 mm

Střední průměr drážky těsnění (d_2)

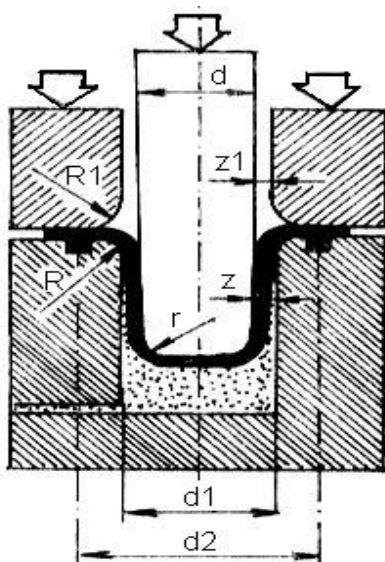
- empirický vzorec

$$d_2 = d_1 + 2R + H + 4 \text{ [mm]} \quad (2.5)$$

kde H je šířka těsnění, většinou H = 5 mm

R – zaoblení tažnice [mm]

d_1 – průměr tažnice [mm]



Obr. 17 Parametry prostého hydromechanického tažení [14]

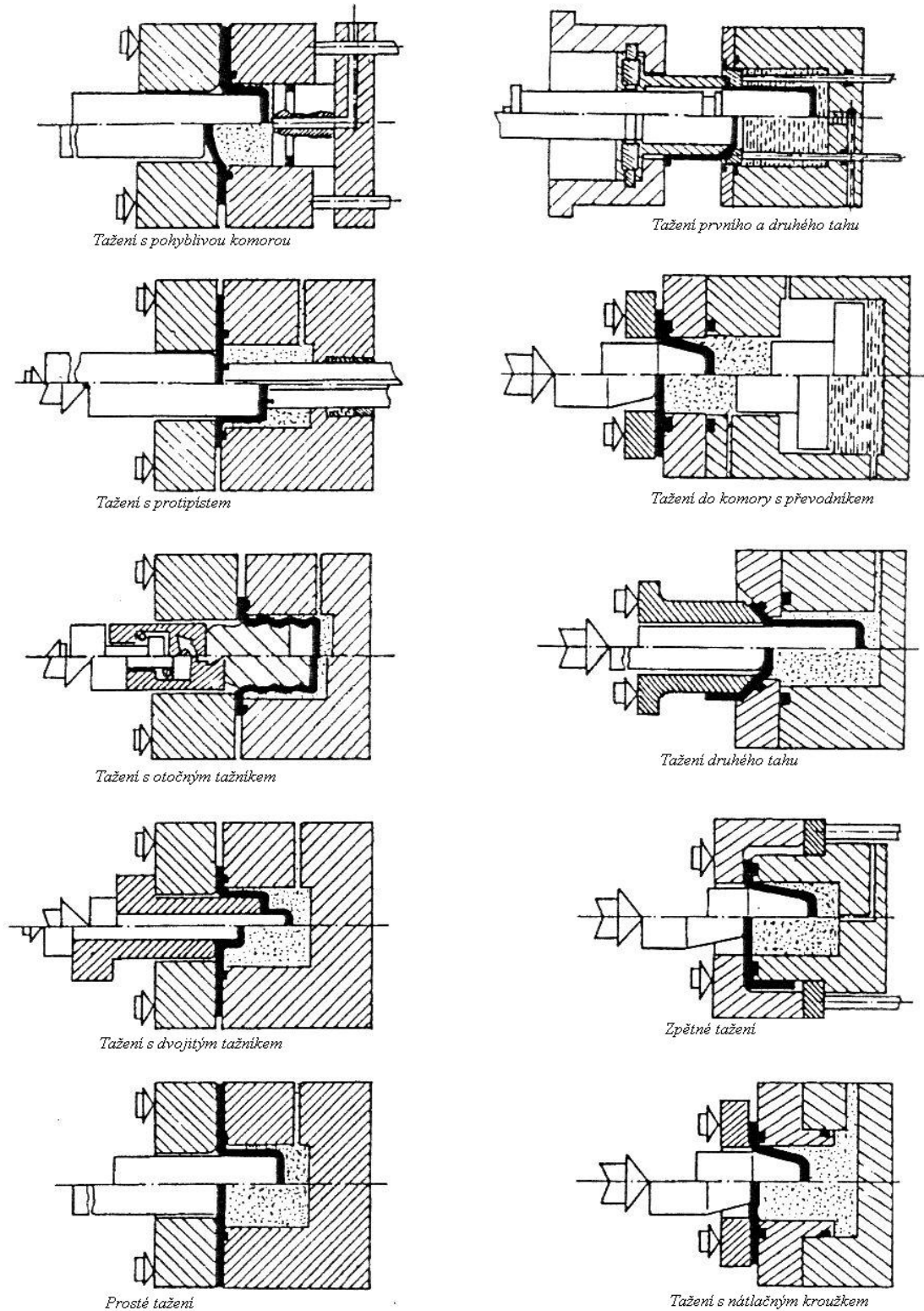
2.5.4 Vybrané materiály vhodné k hydromechanickému tažení [7]

Hydromechanickým tažením lze zhotovovat výtahy z celé řady materiálů, od běžných ocelí třídy 11, přes tvrdé nerezavějící oceli třídy 17 až po měděné a hliníkové slitiny.

- uhlíkové oceli třídy 11 (R_m 280 až 500 MPa)
11 300, 11 301, 11 302, 11 304, 11 305, 11 320, 11 321, 11 342, 11 402
- nerezavějící oceli třídy 17 (R_m 500 až 700 MPa)
17 240, 17 241, 17 242, 17 246
- měď a slitiny mědi (R_m 206 až 309 MPa)
42 3003.11, 42 3004.11, 42 3005.11, 42 3016.11, 42 3201.11, 42 3202.11, 42 3210.11
- hliník (R_m 70 až 100 MPa) a jeho slitiny:
42 4003.11, 42 4004.11, 42 4005.11, 42 4006.11

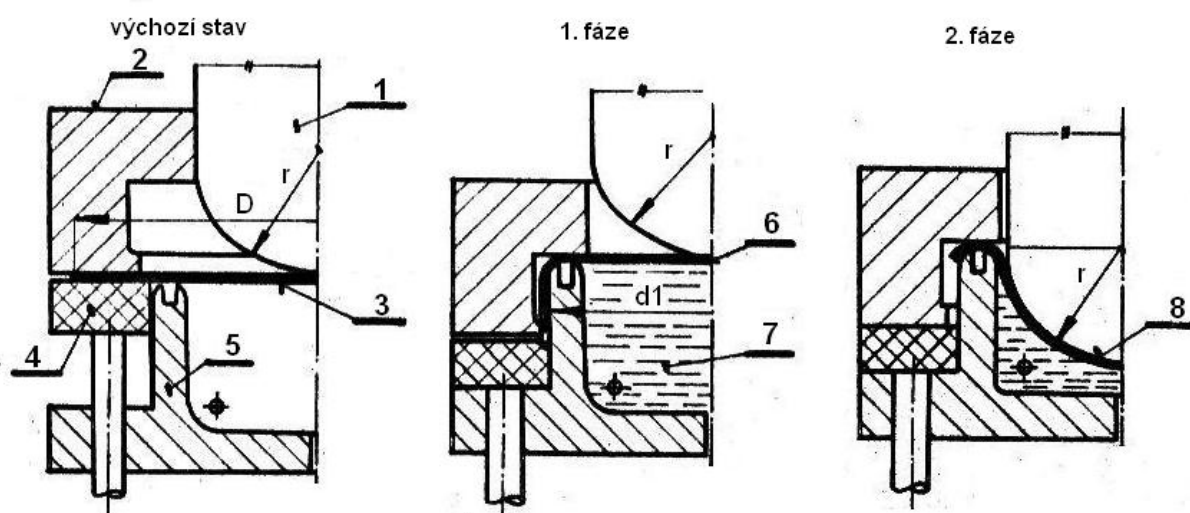
2.5.5 Varianty hydromechanického tažení

V současné době existují více jak dvě desítky variant HMT. Z konstrukčního hlediska lze HMT rozdělit podle stavby tažníku na: tažníky hranaté a nesymetrické, tažníky s proměnným povrchem a pod. Na obr. 18 jsou uvedeny některé nejpoužívanější druhy hydromechanického tažení.



Obr. 18 Základní varianty HMT [7]

Převrácený způsob tažení spojený s tažením hydromechanickým



Obr. 19 Kombinace hydromechanického a převráceného způsobu tažení [5]

Na obr. 19 je zobrazeno schéma nástroje, který slučuje klasický způsob tažení s tažením hydromechanickým. Na levém obrázku je znázorněna výchozí situace, kde přístříh (3) o průměru D je vložen na sekundárním přidržovači (4) a na zaoblení tažnice (5). K sekundárnímu přidržovači je přístříh přitlačen primárním přidržovačem (2). Tažník (1) s poloměrem r je nyní ve výchozí poloze.

V první fázi tažení je z přístříhu zhotoven válcový výtažek (6) o průměru d_1 se stupněm tažení $K_1 = D/d_1$. Příruba je vytažována z prostoru mezi primárním a sekundárním přidržovačem při jejich pohybu směrem dolů a plášť výtažku vzniká mezi vnitřní funkční plochou primárního přidržovače a vnější plochou tažnice. Zaoblení dna výtažku odpovídá poloměru zaoblení tažnice. Poté je uzavřený prostor tažnice vyplněn tlakovou kapalinou (7), tažník stále zůstává ve výchozí poloze.

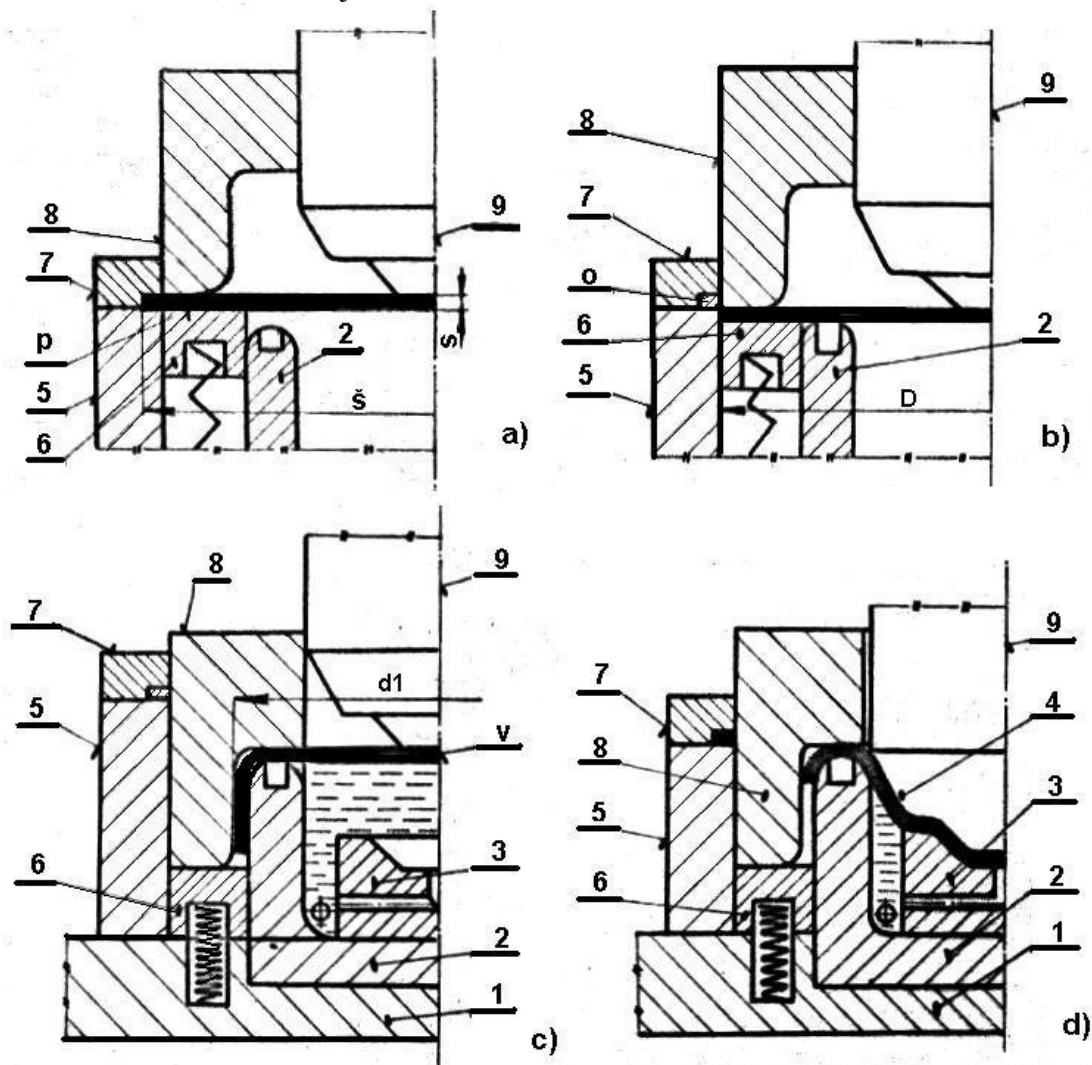
V druhé fázi tažení se vytáhne z válcového výtažku (6) polokulový výtažek (8) tak, že tažník při svém pohybu směrem dolů přetahuje plášť přes zaoblení tažnice do tlakové kapaliny.

Použití sdruženého nástroje

Sdružený nástroj (obr. 20) se skládá ze základové desky (1), v níž je vsazena tažnice (2), která má uvnitř prostor pro naplnění tlakovou kapalinou a ve své funkční části má potřebný poloměr a těsnění. V prostoru tažnice je umístěna vložka (3) pro vytvarování dna výtažku (4). Ve vložce musí být zhotoveny otvory pro vytlačení kapaliny. Na základové desce je upevněna střížnice (5) a mezikruží mezi střížnicí a tažnicí se pohybuje sekundární přidržovač (6), který je ovládán pružinou. Na střížnici je vodící deska (7) pro vedení pásu plechu. Střížník (8) má v našem případě 3 funkce – vnější obrys stříhá, čelo slouží jako primární přidržovač a vnitřní funkční část jako tažník (9).

Postup výroby výtažku:

- vsunutí pásu plechu do střížného prostoru s vysunutím sekundárního přidržovače
- vystřížení přístříhu o průměru D mezi břity střížníku a střížnice. Při pohybu střížníku směrem dolů je přístříh přitlačen k zaoblení tažnice a současně je také přitlačen sekundárním přidržovačem k čelu střížníku vhodným měrným tlakem, protože v další fázi probíhá tažení. Odpad o zůstává v prostoru mezi čelem střížnice a vodící deskou.
- poté následuje převrácené tažení, kdy z přístříhu a průměru D vytáhneme výtažek v o průměru d_1 se stupněm tažení $K=D/d_1$. Při pohybu střížníku směrem dolů je příruba přístříhu vytahovaná ze sevření mezi čelem střížníku a sekundárním přidržovačem. Vnitřní funkční plocha střížníku postupně vytváří válcový plášť výtažku okolo vnějšího obvodu tažnice. Dno výtažku je tvarováno zaoblením tažnice. Před začátkem další fáze se do prostoru tažnice vpustí tlaková kapalina.
- následuje tvarování válcového výtažku tvarovým tažníkem do tlakového prostoru tažnice. Válcový plášť se při pohybu tažníku směrem dolů přetahuje přes zaoblenou hranu tažnice, ve které je těsnění.



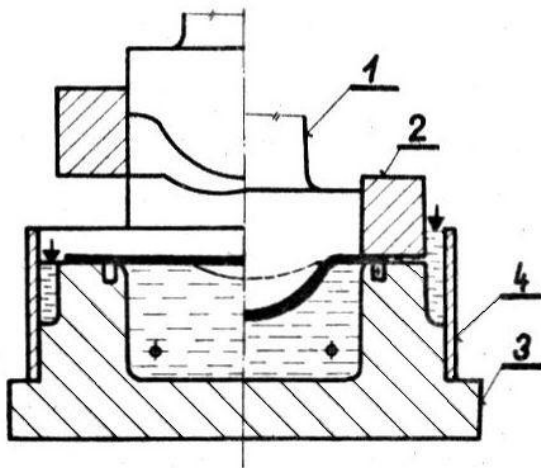
Obr. 20 Použití sruženého nástroje [5]

- vsunutí pásu plechu do střížného prostoru
- vystřížení přístříhu o průměru D
- převrácené tažení válcového výtažku
- tvarování výtažku tvarovým tažníkem

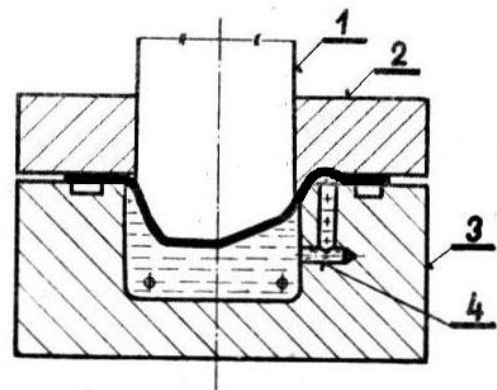
Tažení výtažků s tvarovou přírubou

Hydromechanickým tažením je možné táhnout výtažky s nerovnou (tvarovou) přírubou. Tažnice (3), její těsnění a přídržovač (2) mají tvar příruby, přičemž tažník (1) tvaruje střední část výtažku. Tažnici obepíná plechová objímka (4) a v prostoru mezi objímkou a tažnicí se shromažďuje potřebná kapalina. V levé části obr. 21 je zobrazena výchozí situace, kde pod přístřihem je tlaková kapalina a protože je čelní plocha tažnice nerovná, dojde k vytečení části kapaliny do prostoru mezi objímkou a tažnicí. Na pravé části obr. 21 je vidět závěrečná fáze tažení, přičemž nejdříve dosedne tvarový přídržovač, který dá přírubě potřebný tvar. Zároveň se ještě vytlačí část kapaliny z tlakového prostoru tažnice a tím se zvýší hladina mezi objímkou a tažnicí. Poté už následuje samotné tažení. Pro přívod kapaliny, regulaci tlaku a odvod tlakové kapaliny jsou zhotoveny otvory v tlakovém prostoru tažnice.

Přírubu výtažku je také možno tvarovat v tažidle, které je zobrazeno na obr. 22. Místní tvarování příruby je způsobeno tlakem kapaliny, která je přiváděna otvory (4) do stykové plochy přídržovače (2) a tažnice (3). V čelní ploše tažníku je vyroben příslušný tvar výtažku.



Obr. 21 Zhotovení výtažku s tvarovou přírubou [5]



Obr. 22 Místní tvarování příruby tlakovou kapalinou [5]

2.5.6 Konstrukce nástroje pro hydromechanické tažení

Konstrukce nástroje je nejlépe zřejmá v porovnání s konvenčním tažidlem:

- horní části tažidla (tažník a přídržovač) jsou v podstatě stejné
- v tažnici musí být narozdíl od konvenční tažnice uzavřený prostor pro tlakovou kapalinu, otvory pro přívod a odvod tlakové kapaliny a těsnění před zaoblením hrany tažnice
- pro těsnění je před vstupní zaoblenou hranou tažnice vyroben zápich. K těsnění se používá speciálních otěruvzdorných umělých hmot až do tlaku 30MPa. Pro vyšší tlaky je vhodné povrch pomědit. Pro nejvyšší tlaky se využívá kovového těsnění, které je zespodu spojeno kanálky s tlakovým prostorem
- do otvorů pro přívod a odvod tlakové kapaliny jsou napojeny tlakové trubky s příslušným regulačním zařízením

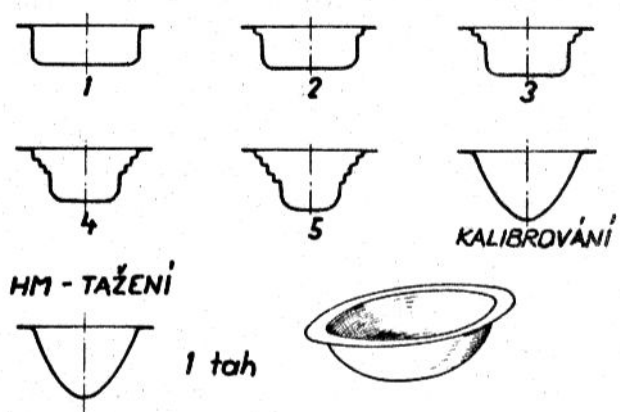
Na obr. 23 jsou ukázány nástroje pro 3 různé výtažky před a po tažení.



Obr. 23 Ukázka hydromechanického tažení [10]

Koncepce nástrojů pro HMT

Z hlediska výroby jsou mnohem jednodušší a lacinější oproti klasickému tažení, protože odpadá vyrábění negativního tvaru v tažnici. Vnitřní tvar výtažku je určen tvarem tažníku. Spodek nástroje (tažnice s tlakovým prostorem) je tedy univerzálnější a také v podstatě eliminujeme poloměr zaoblění tažnice a tažnou vůli. Nespornou výhodou je fakt, že hydromechanickým tažením vytvoříme výtažek v jedné operaci, tedy i celkové náklady na nástroje jsou nižší než u konvenčního nástroje. Tento rozdíl je dobře patrný z obr. 24 při výrobě parabolického výtažku, který zobrazuje postup tažení konvenčním způsobem, tedy 5 tažných operací a jedna operace kalibrační. Při HMT vyrobíme daný výtažek v jedné operaci. Pokud bychom uvažovali cenu nástroje při klasickém tažení 100%, pak by cena při hydromechanickém tažení klesla na přibližně 11,5%! Přitom také u HMT odpadají náklady na meziřihání, které by bylo nutné zařadit při klasickém tažení. Stejně jako u konvenčního tažení můžeme při hydromechanickém tažení používat tažidel pro převrácený tah, tažidel sloučených a sdružených. U hydromechanického tažení se využívá tlakové kapaliny a s tím souvisí náklady na realizaci tlakových rozvodů, řízení tlaku, údržbu atd.



Obr. 24 Počet tažných operací [5]

Na obr. 25 jsou uvedeny příklady součástí vyráběných hydromechanickým tažením, konkrétně se zde jedná o výrobky rakouské firmy *HMT Technologie und Handel GmbH*.



Obr. 25 Produkty hydromechanického tažení [10]

2.5.7 Stroje pro hydromechanické tažení [5], [11]

Volba stroje pro hydromechanické tažení je závislá především na druhu a složitosti výtažku. Pro jednodušší výtažky lze použít klasické hydraulické lisy vybavené speciálními nástroji a příslušenstvím. Pro složitější dílce je výhodnější pořízení speciálního hydromechanického lisu. Stroje lze rozdělit na:

- jednočinné – pro mělké výtažky
- dvojčinné – pro hluboké výtažky
- speciální – pro nejnáročnější aplikace

Hydromechanický lis HMD

Příkladem speciálního lisu může být např. hydromechanický lis HMD od firmy AP&T s podpůrným olejovým diagramem pro hydromechanické tváření (obr. 26). Je speciálně vyvinut pro komplexní tváření hlubokotažných výlisků.



- Rozměry průměrů přístřihů – 380, 635, 810 mm
- Lisovací tlak – 35, 70, 100 Mpa
- Hloubka tahu 200, 280, 350 mm
- Síla 9200 – 40000 kN
- Síla válce 6500 – 20000 kN
- Rozměry stolu 920x920 – 1300x1300 mm

Obr. 26 Hydromechanický lis HMD [11]

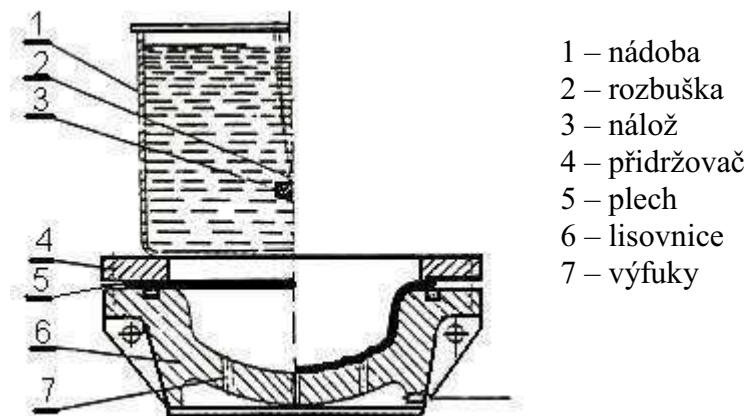
2.6 Vysokorychlostní tváření [6], [8], [16]

Při tváření výbuchem je energie uvolněná detonací vhodné volené nálože přenášena na tvářený plech prostřednictvím vzduchu, písku, hlíny nebo kapaliny. Právě kapaliny je nejčastěji využíváno jako nosného média, a proto tuto metodu můžeme zařadit mezi nástroje využívající kapaliny ke zhotovení požadovaného tvaru součásti.

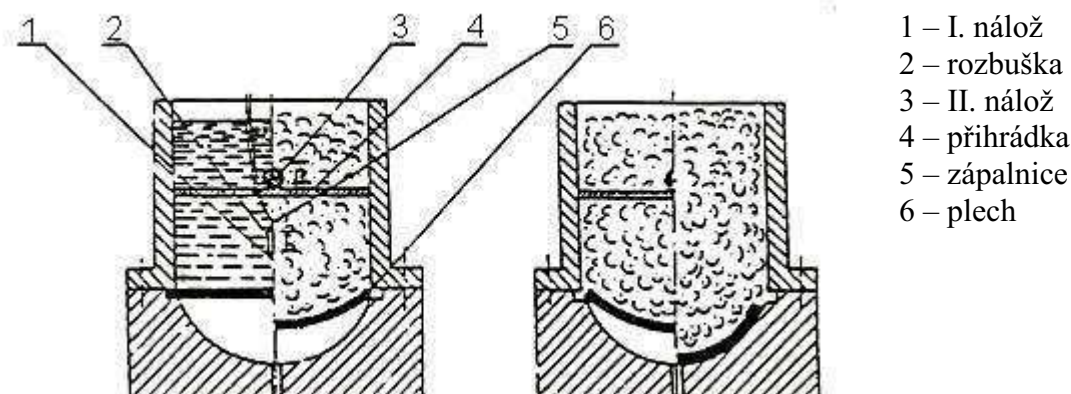
2.6.1 Princip metody

Podstatou metody je nahrazení síly a rychlosti lisu (běžně 10 – 30 m/s) na materiál účinkem tlakové vlny vyvozené explozí. V tomto případě bývá rychlost tváření až 250 m/s. Účinek bude tím větší, čím větší bude množství výbušniny a čím větší hustotu bude mít prostředí, kterým je účinek tlakové vlny přenášen. Proto se pro rozměrnější výtažky využívá písek nebo hlína. Přetvárné tlaky mohou dosáhnout až 10 000 MPa a teploty až 1300°C. Tvar výlisku je relativně přesný s minimálním nebo žádným zpětným odpružením. Nejčastěji je tato metoda využívána pro obtížně tvářitelné materiály.

K přetvoření může dojít na 1 operaci (obr. 27), nebo na více operací při postupném odpalování náloží (obr. 28).



Obr. 27 Jednoduché tažení na jednu operaci [16]



Obr. 28 Jednoduché tažení na dvě operace [16]

2.6.2 Historie

Tváření výbuchem bylo použito nejprve v 60. letech v USA a v SSSR pro letecké a vesmírné účely. Během 80. let ovšem tato technologie nacházela jen těžko uplatnění z důvodu vývoje jiných tvářecích technologií bez potřeby takových bezpečnostních opatření, jaké s sebou přináší používání výbušnin. Zároveň se však v 70. letech rozvíjela technologie explosivního svařování. Tváření výbuchem bylo použito k explosivnímu svařování velkých desek z titanu nebo hliníku s ocelí. K znovuzavedení vysokorychlostního tváření vedla potřeba výroby komplikovaných součástí v malých sériích. Na tyto zakázky se začaly specializovat menší firmy. Příkladem může být nizozemská firma Exploform B.V., která tuto metodu využívá od roku 1998.

2.6.3 Využití metody

Před samotným tvářením je nejprve celý proces simulován pomocí speciálně vyvinutého programu (např. Autoform). To umožňuje vyvarovat se případných chyb při tváření nových dílců a předpovídá konečné vlastnosti výtažků (tloušťka stěny, odpružení, atd.).

Velkou výhodou této metody je možnost její aplikace pro jakékoliv tvary a hmotnosti. V podstatě není žádné omezení velikosti, tvaru ani materiálu. V současné době jsou úspěšně tvářeny dílce o rozměrech 10x2 metry při tloušťkách od 0,3mm u hliníku až po 60 mm u nerezavějících ocelí. Dále lze tvářet mnoho druhů slitin hliníku, titanu, niklu, apod. Tyto parametry však nejsou limitní a neustále se vylepšují. Polotovarem pro tváření mohou být ploché nebo naohýbané plechy, trubky, dokonce i ve svařovaném stavu při různých tloušťkách jednotlivých kusů.

Nástroje pro tváření výbuchem bývají poměrně jednoduché. Tvoří je jen jedna část negativního tvaru výrobku \Rightarrow jednodušší a rychlejší výroba nástroje \Rightarrow nižší cena nástroje snižuje cenu produktu. Nástroje se nemusí instalovat do žádného stroje a výroba tedy může začít okamžitě.

Na obr. 29 jsou uvedeny příklady součástí vyrobených explosivním tvářením. Jedná se zejména o součásti automobilů, letadel, turbín v elektrárnách, části budov, ale také o umělecké předměty.



Obr. 29 Produkty vysokorychlostního tváření [8]

3. Závěr

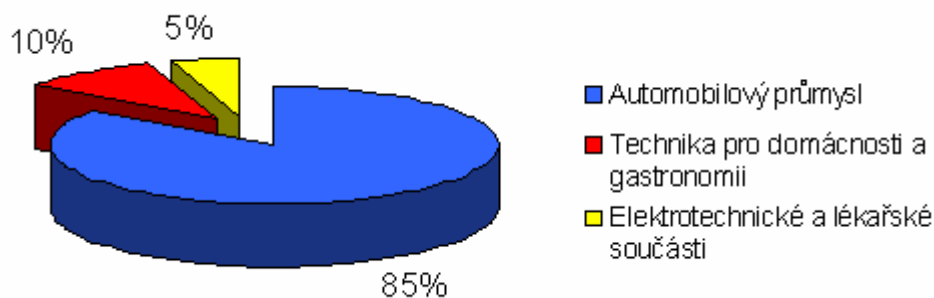
Cílem bakalářské práce bylo vytvořit přehled moderních technologií využívajících kapalinu jako nepevného tvářecího nástroje, porovnání výhod a nevýhod s konvenčními metodami a názorné ukázky součástí vyráběných v praxi.

V dnešní době již existuje mnoho různých „odvozenin“ speciálních metod tváření, jež by svou obsáhlostí překročily rozsah této bakalářské práce. V předložené práci jsou uvedeny hlavní metody tváření kapalinou, ze kterých byly a jsou postupně odvozovány metody nové, vhodnější pro zpracování konkrétních dílců.

Nekonvenční metody tváření plechů jsou nenahraditelnou technologií zejména v leteckém a automobilovém průmyslu. Dovolují konstruktérům a designérům vytvářet lehčí a pevnější skořepiny, komplikované tvary karoserií a dalších součástí, jejichž výroba kovovými nástroji by byla složitá a finančně náročná.

Z produkce hydromechanického tažení připadá na automobilový průmysl přibližně 85% výrobků, 10% na techniku pro domácnosti a gastronomii a 5% na elektrotechnické a lékařské součásti (obr. 30). Příkladem výrobků pro automobilový průmysl jsou části katalyzátorů, tlakové nádoby, olejové filtry, výfukové potrubí pro automobily i motocykly, reflektory atd. Pro domácnosti to jsou například nádoby fritéz, mixérů, nádobí, dřezy a další části vyráběné převážně z nerezové oceli.

V porovnání s konvenčními metodami má tváření kapalinou mnoho výhod z hlediska technologického i ekonomického. Uplatnění nachází především ve velkosériové výrobě, např. automobilový průmysl. Může za to vyšší pořizovací cena speciálních lisů a mnohdy jejich jednostranné využití. To je také důvodem, proč tyto nekonvenční metody nemohou plně nahradit klasické metody tváření. Ačkoli byly vyvinuty před desítkami let, stále představují okrajové způsoby tváření, existující souběžně s metodami konvenčními.



Obr. 30 Využití produktů hydromechanického tažení

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Amalco : American aluminium company* [online]. c2001 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.amalco.com/home.htm>>.
- [2] *American Hydroformers Inc.* [online]. c2004 [cit. 2008-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.americanhydroformers.com/>>.
- [3] *Boltjes International spol. s r.o.* [online]. c2006 [cit. 2008-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.boltjes.cz/>>.
- [4] *C.B Kaupp & Sons, Inc.* [online]. 2004 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.kaupp.com/home.html>>.
- [5] DOUBRAVSKÝ, Miroslav. *Vybrané statě z tváření III. díl : Ohýbání a tažení plechů*. 1. vyd. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1971. 106 s.
- [6] DVOŘÁK, Milan, et al. *Technologie II*. 1. vyd. Brno : PC-DIR Real, s.r.o., 2000. 238 s. ISBN 80-85895-24-2.
- [7] DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. *Technologie tváření : Plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno : PC-DIR Real, s.r.o., 1999. 200 s. ISBN 80-214-1481-2.
- [8] *Exploform B.V.* [online]. c2008 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.exploform.com/index.php>>.
- [9] *Hi-Craft Metal Products, Inc.* [online]. 2001 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.hicraftmetal.com>>.
- [10] *HMT Technologie und Handel GmbH* [online]. 2000 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.hmt.co.at/eng/index.htm>>.
- [11] *Intech spol. s r.o.* [online]. c2007 [cit. 2008-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.intech.cz/>>.
- [12] *PMF Industries, Inc.* [online]. c2000-2007 [cit. 2008-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.pmfind.com/>>.
- [13] ROMANOVSKIJ, V. P. *Příručka pro lisování za studena*. Adolf Nejepsa; Josef Vladyka; Libuše Hokrová. 1. vydání. Praha : SNTL, n.p., 1959. 540 s.
- [14] ŠPAČEK, Jindřich, ŽÁK, Ladislav. *Speciální technologie I a II - návody do cvičení : plošné tváření*. 1. vyd. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1991. 109 s. ISBN 80-214-0259-8.
- [15] ŠPAČEK, Jindřich. *Problematika tažení složitých dílců z plechu hydromechanickým způsobem*. Brno : VÚTS, 1981. Vedoucí dizertační práce Prof. Ing. Doubravský Miroslav CSc.
- [16] LENFELD, Petr. *Technologie II. Skripta TKP* [online]. 2007 [cit. 2008-04-15]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm>.
- [17] *Toledo Metal Spinning Company* [online]. c2004 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.toledometalspinning.com>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
D	Průměr přístříhu	[mm]
d	Průměr tažníku	[mm]
d ₀	Vnější průměr trubky	[mm]
d ₁	Průměr tažnice	[mm]
d ₂	Střední průměr drážky těsnění	[mm]
d _v	Průměr výtažku	[mm]
F _a	Axiální deformační síla	[N]
F _{ht}	Tažná síla	[MN]
F _p	Přidržovací síla	[N]
H	Šířka těsnění	[mm]
h ₁ , h ₂	Výška výtažku	[mm]
K ₁	Stupeň tažení	[-]
p _{max}	Maximální tlak	[MPa]
p _{min}	Minimální tlak	[MPa]
p _N	Tlak kapaliny v tažné komoře	[MPa]
p _p	Přidržovací tlak	[MPa]
r	Zaoblení tažníku	[mm]
R	Zaoblení tažnice	[mm]
R ₁	Zaoblení přidržovače	[mm]
R _e	Mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
S	Plocha půdorysného průmětu výtažku	[mm ²]
s	Tloušťka stěny výtažku	[mm]
s ₀	Počáteční tloušťka plechu	[mm]
š	Šířka pruhu plechu	[mm]
z	Tažná mezera mezi tažníkem a tažnicí	[mm]
z ₁	Mezera mezi tažníkem a přidržovačem	[mm]