



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PLOŠNÉ TVÁŘENÍ POMOCÍ KAPALINY

SHEET METAL FORMING USING LIQUID

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petr FRIES

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jan ŘIHÁČEK

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Fries

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

Plošné tváření pomocí kapaliny

v anglickém jazyce:

Sheet metal forming using liquid

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o vypracování literární rešerše možného využití kapaliny jako nepevného tvárecího média v plošném tváření. Zpracování bude obsahovat přehled v současné době využívaných metod, jejich principy, příklady vyráběných dílu, výhody a nevýhody.

Cíle bakalářské práce:

Provedení literární studie zaměřené na metody tváření, které využívají jako tvárecí médium kapalinu se zhodnocením jejich využitelnosti a příkladu použití.

Seznam odborné literatury:

1. ALTAN, Taylan. Sheet metal forming: processes and applications. Materials Park, OH: ASM International, 2012, 338 s. ISBN 978-1-61503-844-2.
2. BOLJANOVIC, Vukota. Sheet Metal Forming Processes and Die Design. New York: Industrial Press, 2004. 219 s. ISBN 0-8311-3182-9.
3. DVORÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
4. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York : Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.
5. PETRUŽELKA, Jirí. Tvaritelnost a nekonvenční metody ve tváření. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2000. 156 s. ISBN 80-7078-635-3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Řiháček

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

FRIES Petr: Plošné tváření pomocí kapaliny

Tato práce je zaměřena na nekonvenční technologie využívající kapalinu jako tvářecí médium. Práce uvádí princip tvářecích metod hydroforming a jeho variací, wheelon, flexform hydromechanického tažení a explozivního tváření s ukázkami součástí vyrobených jednotlivými metodami. Porovnání jejich výhod i nevýhod s konvenčními způsoby výroby.

Klíčová slova

Tváření, kapalina, exploze, hydroforming, flexform

ABSTRACT

FRIES Petr: Plošné tváření pomocí kapaliny

This work is focused on unconventional technology using liquid as forming medium. The thesis presents the principle of forming methods hydroforming and its variations, wheelon, Flexform, hydromechanical drawing and explosive forming with examples of parts produced individual methods. A comparison of their advantages and disadvantages with conventional production methods.

Key words

Forming, liquid, explosion, hydroforming, flexform

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Fries Petr: *Plošné tváření pomocí kapaliny*. Brno, 2014. 28 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Jan Řiháček.

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 dne 29.5.2015

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi za cenné připomínky, rady týkající se zpracování mé bakalářské práce a za ohromnou trpělivost a ochotu. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu a kolegům z firmy SAAB Czech s.r.o. A svému zaměstnavateli, jež mi umožnil flexibilitu směn a naddělávání času stráveného ve škole.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

	Str.
ÚVOD	- 9 -
1 METODA HYDROFORMING	- 10 -
1.1 Nízkotlaký hydroforming	- 12 -
1.2 Vysokotlaký hydroforming	- 13 -
1.3 Postupový hydroforming	- 14 -
1.4 Pillow hydroforming	- 16 -
2 WHEELON	- 18 -
3 FLEXFORM	- 20 -
4 HYDROMECHANICKÉ TAŽENÍ	- 22 -
5 EXPLOZIVNÍ TVÁŘENÍ	- 24 -
ZÁVĚRY	- 28 -
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	
SEZNAM OBRÁZKŮ	

ÚVOD [4], [9], [32]

V dnešní době se při zpracování různých materiálů využívá pokročilých znalostí o materiálech. Postupem času, jak se zdokonaľovaly technologie, prohlubovaly se i znalosti o struktuře kovových, nekovových materiálů a jejich slitin. V průmyslu se stále vyvíjí a používají nové materiály, které mají lepší pevnostní a mechanické vlastnosti. Vyrábí se tvarově složitější díly.

Vzhledem ke zvyšující se náročnosti zpracovávání těchto materiálů, se konvenční způsoby výroby v některých odvětvích začaly nahrazovat metodami nekonvenčními. Kde je použito při tváření polotovaru metod, které nepracují jen s pevnými nástroji. Jeden z dvojice pevných nástrojů je zde nahrazen nástrojem pružným, tedy kapalinou, pryží, sypkým materiálem apod. Tyto metody tváření zaznamenaly velký nárůst i z důvodu urychlení produkce a zvýšení pružnosti výroby, případně pro snížení nákladů spojených s pracovními nástroji. Mezi nepoužívanější metody patří výroba výtažků s využitím kapaliny. Využitím této technologie je možné zpracovávat také křehké a těžko tvařitelné materiály. Několik příkladů součástí vyrobených těmito metodami je k vidění na obr.1.



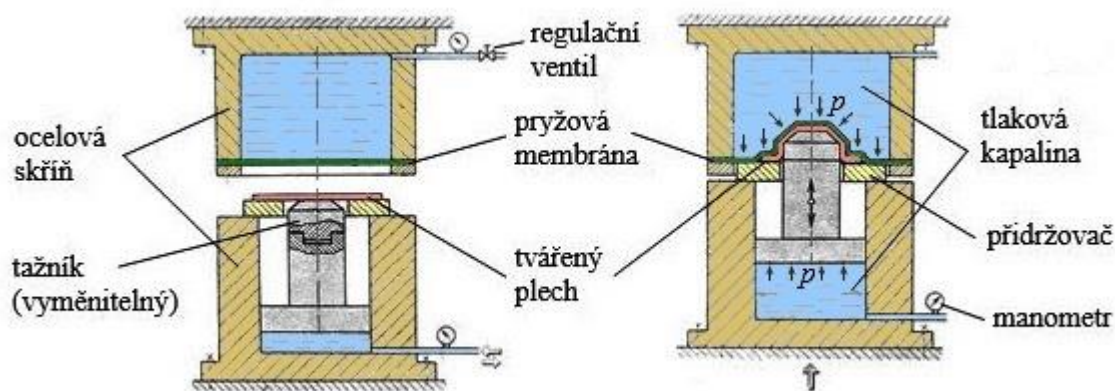
Obr.1 Součásti tvářené metodami využívající kapalné prostředí [4], [9], [32]

1 METODA HYDROFORMING [2], [3], [9], [17], [19], [27], [30]

Konvenční způsob tváření plechů funguje na principu tažník – tažnice, kdy tažník vtlačuje polotovar do tažnice a tím je plech tvářen. U metody hydroforming je tažnice nahrazena tlakovým médiem (kapalinou). Jako tlakové médium je běžně užívaná voda, olej, emulze apod. Kapalina je umístěna v ocelové komoře a od tvářeného plechu oddělena pryžovou membránou.

Při samotném tváření je polotovar tlačén, prostřednictvím tvarového nástroje (tažníku), na pryžovou membránu a zatlačován do pracovního prostoru komory. Tam na něj působí hydrostatický tlak kapaliny působící všemi směry stejnou silou. Působením tohoto tlaku je tvářený materiál přidržovaný membránou po celé své ploše a deformovaný na požadovaný tvar, který je shodný s tvarem tažníku. Na obr. 2 je v řezu nástroje názorně zobrazen proces tváření a směr působení tlaku p na tvářený materiál.

Vzhledem k použitému tlakovému médiu, které působí proti směru tváření je nutné počítat s vyšší tažnou silou a zohlednit ji při volbě lisu. Jako polotovaru je, při tomto způsobu tváření, běžně využíváno přístřihu plechu nebo kruhového výstřižku tzv. rondelu. Hydrostatický tlak kapaliny je možno regulovat pomocí regulačního ventilu. Životnost membrány dosahuje hodnoty 5000 až 10 000 tažení. Tuto životnost lze zvýšit prostřednictvím speciálních povlaků. Tloušťka tažených plechů se pohybuje od 0,2 mm do 10 mm. Tato metoda není vhodná pro tažení hlubokých výtažků.



a) poloha před tažením

b) poloha při tažení

Obr.2 metoda hydroforming [34]

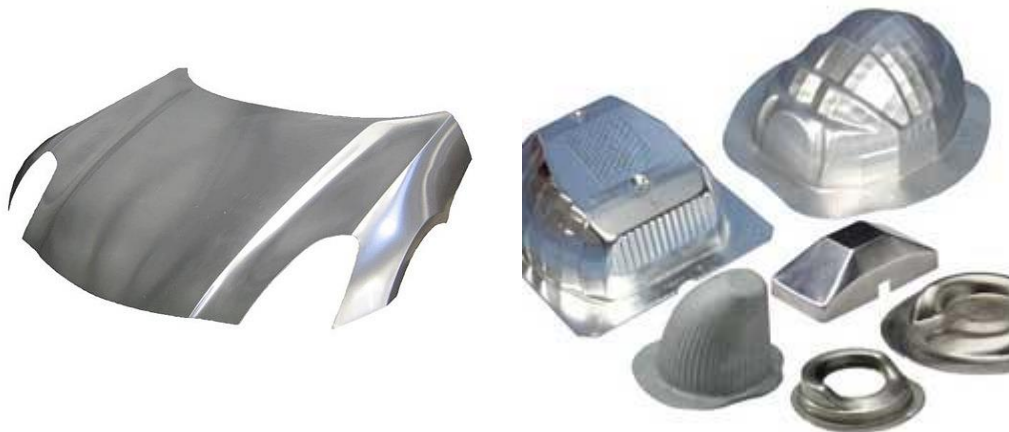
Metoda tváření hydroforming je nejvíce využívanou technologií v oblasti automobilového a leteckého průmyslu. Vzhledem ke svému konstrukčnímu řešení je vhodná pro kusovou a prototypovou výrobu výlisků.

U každého výlisku je však nutné počítat s jeho rozměry, s pracovním prostorem stroje a silou, kterou dokáže vyvinout. Jako příklad rozměrových možností velikosti výlisku a potřebného volného místa pro zajištění plynulého chodu stroje a jeho obsluhu, je zde uvedeno jedno zařízení vyrobené ve firmě Žďas, a.s. viz obr.3.



Obr.3 Speciální hydraulický lis CTV 16000 [27]

Pracovní prostor tohoto stroje je 1 500 x 2 980 mm a maximální hloubka tváření dosahuje 240 mm. Velikost lisu je však 5 320 x 12 900 mm o výšce 4 360 mm. Jmenovitá síla tohoto lisu je 160 MN a pracuje s tlakem kapaliny o velikosti 35 MPa. Na obr.4 je zobrazeno několik běžných výlisků tvářených tímto způsobem. Nejčastějšími výrobky jsou různé součásti automobilů, zejména kapotáž.



Obr.4 výlisky vyrobené metodou hydroforming [19]

➤ Výhody:

- nižší náklady na nástroje (vyrábí se pouze tažník)
- není potřeba přesného slícování nástrojů, jak je tomu u konvenčního způsobu
- pružnější výroba (vyměňuje se pouze jeden nástroj)
- nedochází ke zvlnění a potrhání povrchu součásti
- vhodné pro tažení složitých výtažků a těžko tvařitelných materiálů
- dosahuje se součinitele tažení až $m = 0,4$
- tváření probíhá s velmi malým odpružením materiálu
- průběh ztenčení stěny výtažku je rovnoměrnější než je tomu u konvenčního tažení (průměrné ztenčení se pohybuje okolo 10%)
- další výhodou je nízké tření membrány o dílec, čímž je usnadněn skluz materiálu

➤ Nevýhody:

- zařízení je náročné z hlediska utěsnění hydraulického systému
- vysoká pořizovací cena
- vyšší tažná síla než u konvenčního tažení (na tažník působí protitlak od tlakového média)
- čas tváření je oproti konvenčním metodám prodloužen o dobu, která je nutná ke zvýšení tlaku na potřebnou hodnotu

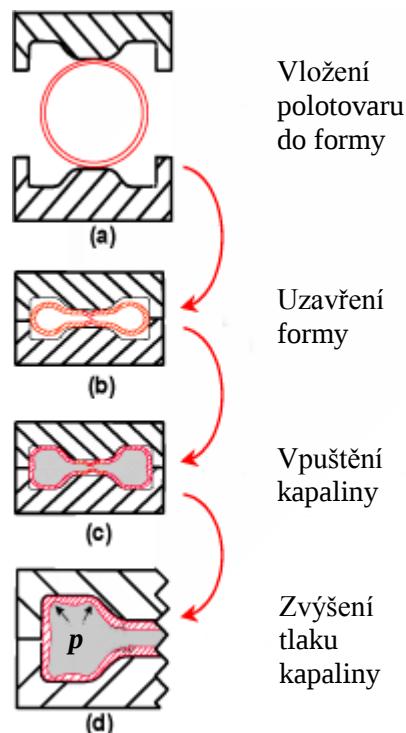
1.1 Nízkotlaký hydroforming [11], [14], [22], [23]

Hydroforming je nejvíce využívanou metodou tváření v automobilové průmyslu nejen pro tvarování plechů kapoty, dveří apod., ale také pro tváření trubkových rámců. Zde je využito tlaku kapaliny uvnitř trubky, jež je polotovarem. Touto technologií jsou na jednu operaci vyráběny součásti, které by bylo nutné běžnými metodami vyrábět svařováním z několika samostatných výlisků. Tváření trubek kapalinou je zvyšována jejich tuhost (ohybová i torzní), případně se při zachování jejich pevnostních charakteristik docílí snížení jejich hmotností.

Nízkotlaký hydroforming se značí zkratkou LPH (vychází z anglického výrazu Low-Pressure Hydroforming) a je využíván pro tváření trubek při nižším tlaku kapaliny (tlakového média). U tohoto typu tváření je použita dvoudílná forma mající téměř totožný obvod jako výchozí polotovaz, kterým je trubka. Metodou LPH nelze výrazně měnit tvary příčného průřezu a nesmí být příliš složité. U složitějšího tvaru může docházet ke svírání materiálu zavírající se formou. Je také nutné vyvarovat se ostřejším hranám, tj. menším poloměrům zaoblení.

Princip metody spočívá v tom, že se po vložení trubky (polotovaru) do dvoudílné formy obě části nástroje spojí viz obr 5a,b. Při spojení těchto dvou částí (uzavření formy) je polotovaz částečně deformován tvarem dutiny ve formě. Poté je do polotovaru napuštěna kapalina dle obr. 5c. Pro potřebnou deformaci se zvyšuje tlak kapaliny a již částečně deformovaná trubka tak získává požadovaný tvar, který kopíruje dutinu formy jak je zobrazeno na obr. 5d. Celý proces je názorně zobrazen ve čtyřech krocích na obr.5.

Působením zvýšeného napětí v kapalině dochází ke zlepšení jakosti povrchu tvářených ploch, tento tlak p však nikdy nepřekročí hodnotu 60 MPa. Použitím tlakového média uvnitř trubky jsou eliminovány nechtěné deformace, jako je například zvlnění povrchu. Lze zpracovávat širokou škálu materiálů z mědi, mosazi, oceli, hliníku, a korozi-vzdorných materiálů. Nízkotlakého hydroformingu je využíváno pro výrobu hudebních nástrojů, výfuků automobilů a motocyklů apod. viz obr.6.



Obr.5 Princip nízkotlakého hydroformingu [23]

➤ Výhody:

- v kontaktní ploše s polotovarem nevznikají třecí odpory
- bezproblémové vyjímání hotových součástí
- lze přesně regulovat tlak a tím i kvalitu výtažku

➤ Nevýhody:

- nelze dosáhnout většího přetvoření polotovaru
- nebezpečí svírání materiálu zavírající se formou



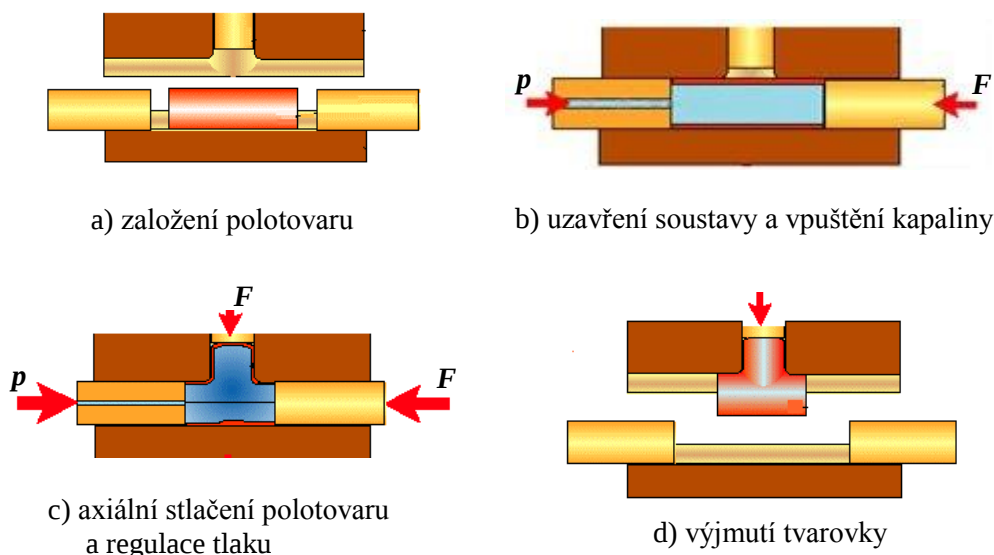
Obr.6 Příklad výrobků tvářených nízkotlakým hydroformingem [11], [14]

1.2 Vysokotlaký hydroforming [4], [12], [23], [25], [26]

Vysokotlaký hydroforming (HPH, z výrazu High-Pressure Hydroforming) je obdobnou metodou jako nízkotlaký hydroforming, avšak umožňuje tvářet i složitější součásti. Vzhledem k vysokým tlakům, které jsou použity, lze tvářet i menší polotovary.

Pokud se touto metodou tváří tvarově složitější díly, volí se obvod polotovaru (trubky) menší než obvod dutiny ve formě. Tím se eliminuje možnost svírání materiálu. Obvod dutiny formy může být až o 10% větší než obvod polotovaru. Po uzavření formy je nutné, prostřednictvím vysokého tlaku kapaliny, průřez trubky zvětšit tak, aby kopíroval dutinu formy. Celý proces tváření je názorně zobrazen na obr. 7.

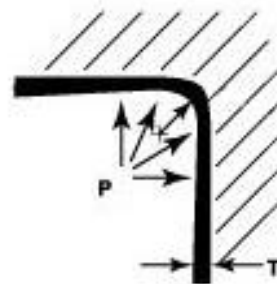
Jelikož při zvětšování průřezu trubky musí být zachován zákon zachování objemu, dochází ke ztenčování stěny. Z toho důvodu je u této metody zavedena axiální síla F , pomocí které je materiál vtlačován do formy, a proto nedochází k nežádoucímu ztenčení stěny. Velikost pracovního tlaku p , který je přes jeden dutý píst pouštěn do trubky, může nabývat hodnot až 240 MPa.



Obr.7 Tváření vysokotlakým hydroformingem [4]

Při využití této vyšší tlakové síly dochází k nerovnoměrnému zúžení stěny o tloušťce T v oblasti většího zakřivení ploch. Jak je vidět na obr.8. U tohoto způsobu tváření se při poslední fázi dotvarují ostřejší hrany, což vede k úbytku materiálu v jejich okolí, tzn. zúží se stěny.

Vzhledem k možnosti tváření menších rádiusů a většího rozšiřování trubek, je tato metoda hojně využívána pro výrobu tvarovek. Tvářené součásti touto metodou, jako jsou tvarovky typu T a výfukové rozvody složitějších tvarů jsou pro lepší představu zobrazeny na obr. 9.



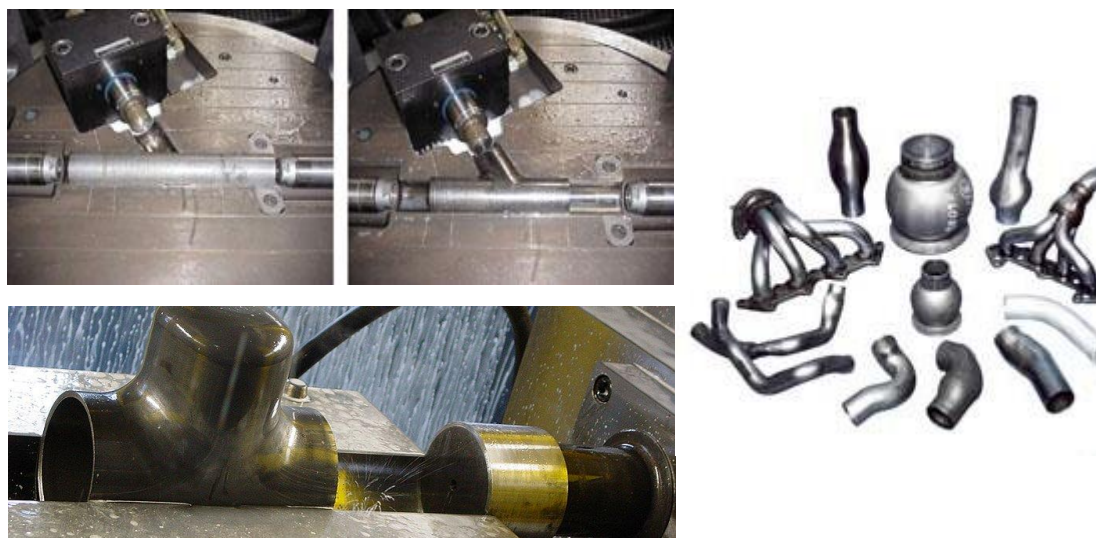
Obr.8 Zúžení stěny v rozích při použití vysokotlakého hydroformingu [23]

➤ Výhody:

- kapalina je téměř nestlačitelná a dokonale se přizpůsobuje jakémukoliv tvaru zápusťky
- bezproblémové vyjímání hotových součástí
- lepší schopnost vytvářet vyboulení a výstupky
- možnost tváření ostřejších hran

➤ Nevýhody:

- je nutné zajistit dokonalé těsnění soustavy
- zúžení stěny v oblastech s menším zaoblením



Obr.9 Typické součásti tvářené vysokotlakým hydroformingem [12], [23], [26]

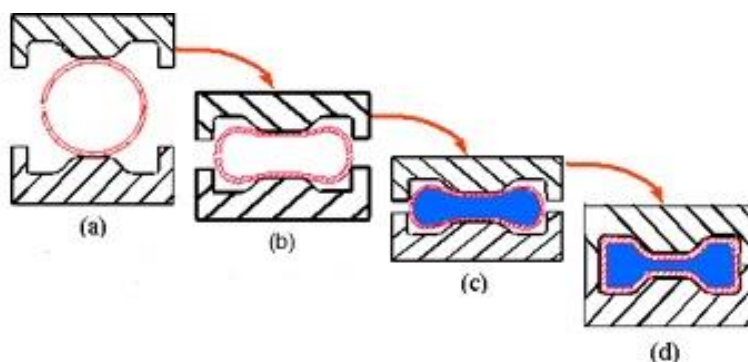
1.3 Postupový hydroforming [20], [23], [24], [25]

Jelikož využitím nízkotlakého hydroformingu nelze dosáhnout většího přetvoření a při použití vysokotlakého dochází ke ztenčení stěny v oblastech s menším zaoblením, byla vyvinuta metoda postupového hydroformingu. Anglicky Pressure-Sequence Hydroforming (PSH), jež eliminuje již zmíněné nedostatky tváření trubek kapalinou použitím nízkého a vysokého tlaku. Tato metoda byla vyvinuta a patentována firmou Vari-Form, a tímto způsobem lze tvářet součásti složitých tvarů z rozsáhlé škály materiálů.

Běžně je možné tvářet polotovary z uhlíkový i legovaných ocelí, vysokopevnostní a obtížně tvařitelné materiály, hliník a jeho slitiny. Tváření probíhá za použití nižších tlaků než u metody vysokotlakého hydroformingu, čímž je dosaženo kratšího času potřebného na výrobu součásti.

Celý proces probíhá ve dvou fázích. V první fázi je do formy vložen polotovar (obr. 5a), forma se částečně uzavře a trubka se zaplní kapalinou viz. obr. 5b,c. Při uzavírání formy je vnitřní tlak kapaliny udržován na poměrně nízkých hodnotách. Po uzavření formy následuje druhá fáze, ve kterém je zvýšen tlak kapaliny (obr.5d). Vyšším tlakem je dotvarován složitý tvar a hrany s malými zaobleními, které tvářením s pomocí nízkého tlaku nebylo možné vytvarovat. Rozdíl ve způsobu tváření mezi metodami nízkotlakého a postupového tváření je zřetelný při porovnání obr. 10, kde je zobrazen postupový hydroforming, a obr. 5.

Dutinu formy lze navrhnout s téměř stejným obvodem jaký má polotovar (trubka). Vzhledem k tomu, že je jen malý rozdíl mezi obvodem polotovaru a výtažku, není stěna trubky natahována. Tudíž dochází jen k minimálnímu ztenčení stěny, a to jen v rozích součásti. Použité tlakové médium je voleno tak, aby tvářenému materiálu poskytovalo ochranu proti korozi.

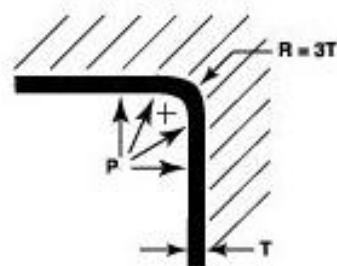


a) založení polotovaru, b) uzavírání formy, c) první etapa tváření, d) druhá etapa tváření
Obr.10 Postupový hydroforming [23]

V první etapě tohoto procesu se tlak pohybuje od 35 MPa do 70 MPa. Ve druhé etapě, kdy dochází ke kalibraci součásti, dosahuje tlak běžně hodnot až 170 MPa. Velikost vyvíjené síly je vždy omezoována výkonem lisu.

Lze tvářet trubky o průměru 25 mm až 150 mm s tloušťkou stěny v rozmezí 0,5 mm až 6 mm. V praxi jsou nejběžněji používané trubky s tloušťkou stěny 1 mm až 3 mm.

Vlivem postupného uzavírání formy, kdy je součást již pod pracovním tlakem p , dochází k lepšímu přemisťování materiálu. Z toho důvodu nedochází k příliš velkému zúžení stěny součásti v oblastech s menšími poloměry zaoblení viz. obr. 11. Menšími poloměry zde rozumíme velikost rádiusu R , která je rovna trojnásobku tloušťky stěny materiálu T .



Obr.11 profil stěny při použití postupového hydroformingu [23]

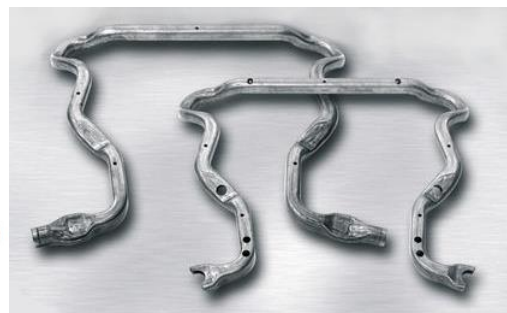
Rovnoměrná tloušťka stěny vytvarované součásti zajišťuje lepší mechanické vlastnosti. Z toho důvodu jsou touto metodou vyráběny součásti, které jsou nejen tvarově velmi složité, ale i dosti namáhané. Mezi takové součásti patří například rámy automobilů, vlnovcové kompenzátory (viz obr. 12) apod.

➤ Výhody:

- dochází k rovnoměrnému rozložení působící síly po celé ploše polotovaru
- rovnoměrná tloušťka stěny výrobku
- vysoká pracovní efektivita
- v případě potřeby lze použít vysoký tlak
- lze vyrábět tvarově složité součásti
- rozměrová stálost
- možnost tvářet materiály s nízkou tažností a vysokou pevností

➤ Nevýhody:

- je nutné zajistit dokonalé utěsnění soustavy



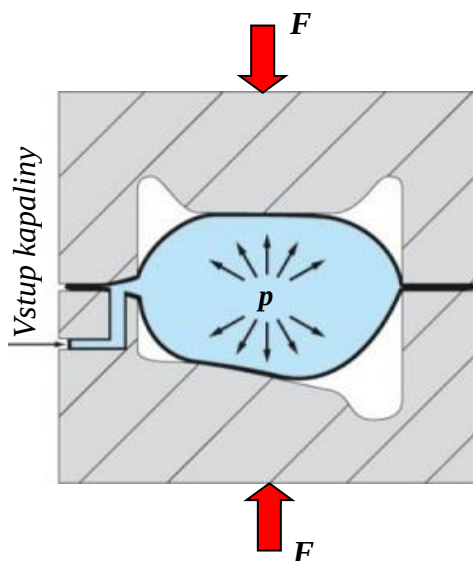
Obr. 12 Využití postupového hydroformingu [20],[24]

1.4 Pillow hydroforming [9], [13], [23]

Jako výchozího polotovaru je zde využito dvou plechových dílů, které mají stejný tvar. Tyto výstřižky jsou po svém obvodu dokonale svařeny. V jednom z plechů musí být otvor pro přivedení kapaliny.

Po vložení polotovaru do zápustky, jejím uzavření a zajištění působící silou F , dle obr. 13, je daným otvorem přivedeno tlakové médium. Přiváděním kapaliny je navyšován tlak p . Dutina mezi plechy je působením tlaku rozšiřována a součást tak získává tvar podle zápustky.

Jelikož při tomto procesu získává dutá nádoba tvar až po svaření, dosahuje se zde velkých přesností. Pokud by byla součást vyráběna ze dvou vyrobených výlisků, které by byly následně svařovány, vlivem nepřesného ustavení by nikdy nebylo dosaženo takové přesnosti. A to je hlavním důvodem vzniku této technologie.



Obr.13 princip metody pillow hydroforming [13]

Pro svařování těchto dílů se běžně používá laseru. Lze však dané výstřižky svařovat i běžnými metodami. Pro uhlíkové oceli je s úspěchem používána metoda MAG, což je svařování tavnou elektrodou v aktivním plynu (CO_2 , případně směs CO_2 a Ar). Nejpoužívanější metodou svařování korozivzdorných a nekovových materiálů je metoda TIG/WIG, tedy svařování wolframovou elektrodou s přídavným materiálem v inertním plynu (nejčastěji Ar).

Při volbě svařovací metody je důležité počítat s tepelným ovlivněním materiálu v okolí svaru, proto je často používána metoda svařování laserem. Svařování laserem pracuje na principu soustředění proudu fotonů o vlnové délce červeného (tepelného) záření na jeden bod na svařovaném materiálu a v tomto bodě prudce zvyšuje jeho teplotu a taví jej. Z toho důvodu je zde tepelně ovlivněná oblast minimální. Pokud by bylo tepelně ovlivněno širší okolí svaru, mohlo by dojít k prasknutí svaru při tváření.

U této metody je velmi důležité, aby svar byl vodotěsný a bez tzv. studených spojů. Podmínkou pro tváření touto metodou je zajištěná svařitelnost zpracovávaného materiálu. Výrobky tvářené tímto způsobem jsou zobrazeny na obr. 14. Jedná se zejména o duté součásti s malým vstupním otvorem, jako jsou nádrže automobilů.

➤ Výhody:

- přesné duté nádoby
- bezproblémové vyjímání hotových součástí
- lze přesně regulovat tlak a tím i kvalitu výtažku

➤ Nevýhody:

- je nutné použití materiálu se zaručenou svařitelností

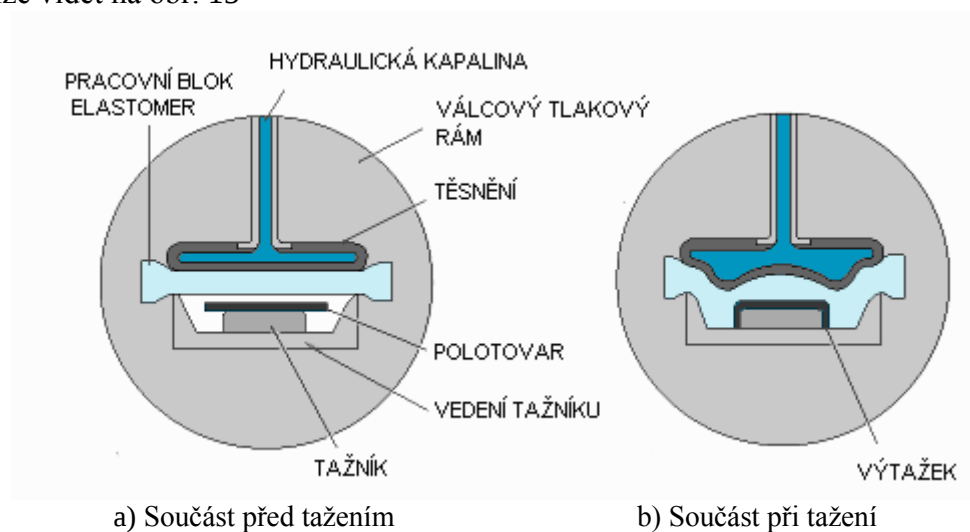


Obr.14 Součásti vyrobené metodou pillow hydroforming [9], [13], [23]

2 WHEELON [1], [2], [3], [6], [8], [21]

Metoda-Wheelon byla vyvinuta z metody Guerin, která využívá síly lisu a pryže jako pružného prostředí. U této metody je tažnice nahrazena blokem s pryžového materiálu a hydraulickou kapalinou jako ovládacího prvku. Užívá se pro tváření mělkých součástí.

Před spuštěním procesu tváření je na tažník položen přístřih plechu, jež je polotovarem. Nad polotovar je umístěn pryžový blok a nad něj je, v těsnící membráně, přivedena kapalina viz. Obr. 15a. Po spuštění tváření začne tlakové médium působit velkou silou na elastický blok, který následně vyvíjí rovnoměrný tlak na tvářený materiál dokud jej nevytvaruje na požadovaný tvar viz. obr. 15b. Po dotvarování součásti je tlak kapaliny snížen, elastický blok se vrátí do původní polohy a hotovou součást lze výjmout. Proces tažení lze vidět na obr. 15



Obr. 15 Metoda wheelon [21]

Rozložení tlaku po stranách formy umožňuje tváření širších přírub, než je tomu u procesu Guerin. V jedné operaci lze formovat i složitější součásti s ostřejšími hranami. Běžně se tváří materiály z uhlíkových i vysokolegovaných ocelí, hliníku, tepelně odolných slitin a slitin titanu. Pracovní tlak kapaliny se pohybuje v rozmezí 40 až 70 Mpa. Stroj s typickými výrobky, což jsou různé části automobilů a letadel, je zobrazen na obr. 16.

- Výhody:
 - přesné součásti s dobrou jakostí povrchu
 - vysoká produktivita
 - rovnoměrný tlak na tvářený materiál
 - vyrábí se pouze jedna matrice
 - nedochází ke zvlnění materiálu
- Nevýhody:
 - vysoký trvářecí tlak
 - malá hloubka tváření

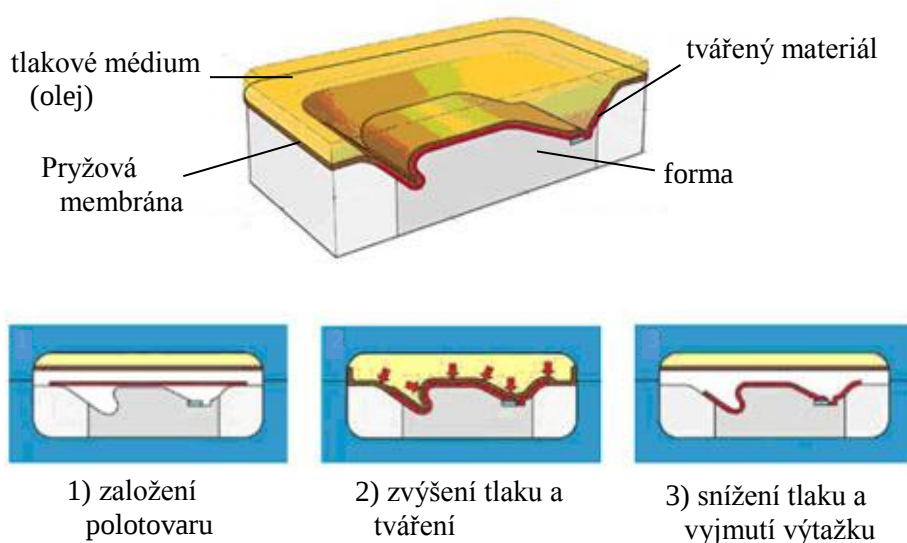


Obr. 16 ukázka stroje a výrobky metody wheelon [6]

3 FLEXFORM [6],[10]

Horní polovina nástroje je tvořena pružnou pryžovou membránou, spodní polovinou je matrice vyrobená z levných a snadno obrobitelných materiálů. Spodní matrice má negativní tvar požadované součásti.

Proces tváření probíhá ve třech krocích (viz obr. 17). V první fázi je na spodní část nástroje přesně založen polotovar a na něj přiložena horní část, která je pevně zaaretovaná. Poté je na pryžovou membránu čerpadlem přivedeno tlakové médium. Při zvyšování tlaku, až do nastavené hodnoty, membrána působí rovnoměrným tlakem na polotovar a ten je tak tvářen do tvaru spodní matrice. Po vytvarování polotovaru je tlak v nástroji snížen na počáteční hodnotu a výtažky jsou vyjmuty ze spodní formy.



Obr. 17 princip metody flexform [10]

Jako tlakové médium je zde nejčastěji používán olej. Používané tlaky u této metody dosahují hodnot až 140 MPa. Lisovací síla se pohybuje ve velmi vysokých hodnotách, až do 150 000 tun (dle velikosti tvářené plochy). Takto vysoké parametry tváření zajišťují velmi přesné rozměry dílů.

Tato technologie je zejména využívána při výrobě součástí motorů v leteckém průmyslu a pro prototypovou výrobu v automobilovém průmyslu. Je hojně využívána pro výrobu různých částí automobilů (viz obr. 18).

➤ Výhody:

- levnější výroba součástí
- dosahuje se vysoké kvality výtažků
- nízké náklady na nástroje
- lze tvářet tvarově velmi složité součásti
- vhodná metoda ke tváření i špatně tvařitelných materiálů

➤ Nevýhody:

- potřeba dokonalého utěsnění systému



Obr. 18 součásti tvářené metodou flexform [6]

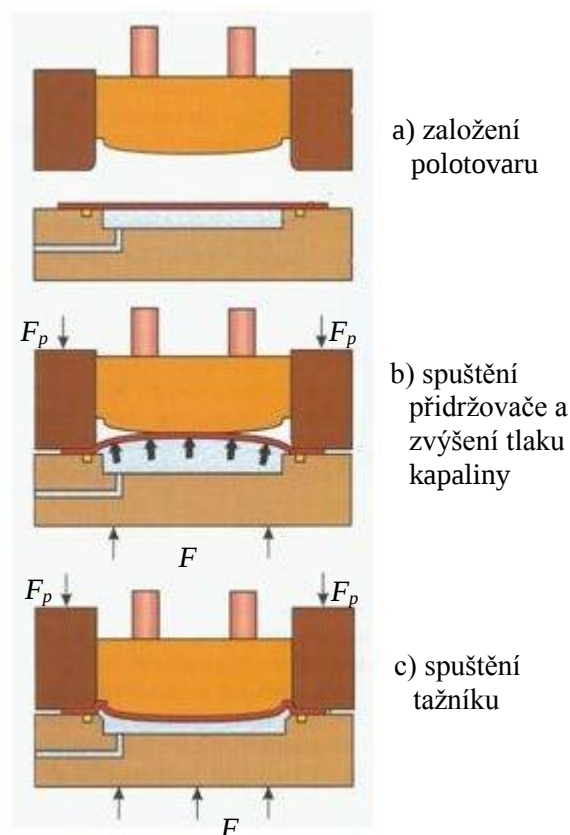
4 HYDROMECHANICKÉ TAŽENÍ [2], [3], [5], [9], [23]

Hydromechanické tažení patří mezi další nekonvenční technologie tváření využívající kapalinu jako tvářecí médium. Tato technologie je vhodná pro tažení hlubokých výlisků rotačního i nerotačního tvaru. Je využívána zejména v automobilovém a leteckém průmyslu.

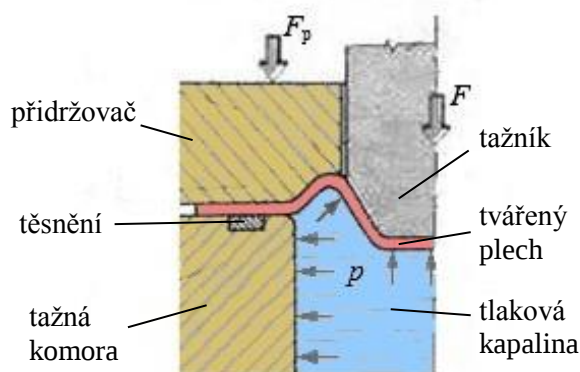
Postup samotného tváření je pěkně vyobrazen na obr. 19. Jak lze vidět, klasická tažnice je zde nahrazena tažnou komorou, která je naplněna kapalinou a její tlak p je regulován z hydraulického obvodu pomocí ventilů. Na zakládací rovinu je položen přístřih plechu, jehož spodní strana je v přímém styku s hladinou tlakového média. Kapalinu a polotovar neodděluje pryžová membrána, jak je tomu u metody hydroforming. Aby kapalina při tažení neunikala, je soustava zatěsněna těsním umístěným v blízkosti tažné hrany a přístřih plechu je přitlačen přídržovačem působícím silou F_p .

V první fázi tažení je tlak kapaliny zvýšen na hodnotu, při které se bude tvářet. Tím je plech deformován proti tažníku a celý proces výroby součásti je od počátku pod pracovním tlakem obr. 19b. V další fázi je tažník tlačěn na plech pracovní silou F a vtlačuje jej do objemu kapaliny v tažné komoře. Tlak v kapalině roste a je regulován škrtícím ventilem. Vlivem tlaku kapaliny je plech nabalován na tažník obr. 19c. Detail tváření v blízkosti těsnění a tažné hrany lze vidět na obr. 20. Po vytvarování výlisku na požadovaný tvar je tlak v takžené komoře snížen, poté je zvednut přídržovač a hotový výlisek lze vytáhnout.

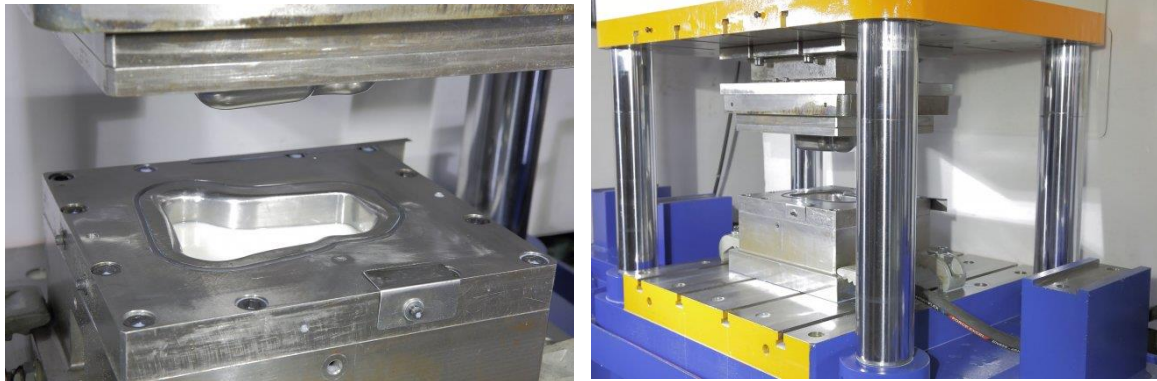
Při tažení je nutné tlak v tažné komoře citlivě regulovat, obzvláště pokud je tvářen tenký plech, kdy je tloušťka stěny výtažku do 1mm. Pro ukázkou stroje, na kterém se tento způsob tváření uskutečňuje, je zde obr. 21 a několik výlisků jež lze vyrábět viz obr.22



Obr.19 princip hydromechanického tažení [9]



Obr.20 detail tažení [9]



Obr.21 Stroj s nepevným nástrojem určený k hlubokému tažení [23]

➤ Výhody:

- Zvýší se tažnost materiálu
- výtažek lze vyrábět na menší počet tažných a mezižihacích operací
- rychlejší výroba
- nižší výrobní náklady
- dosahuje se lepší přesnosti výtažku a kvalitnějšího povrchu
- minimální ztenčení výtažku v ohybu u dna
- nižší pravděpodobnost utržení dna
- lze tvářet složitější díly
- rovnoměrnému rozložení tlaku na celý výtažek
- vhodné i pro křehké materiály
- lze tvářet i materiály jako je molibden a titan

➤ Nevýhody:

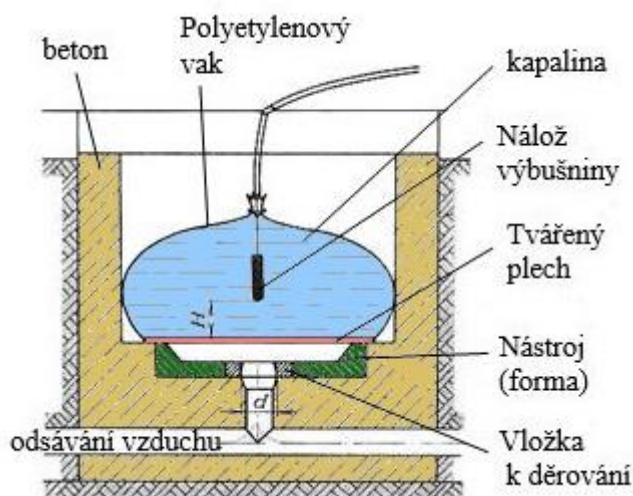
- Je nutné používat speciální stroje a nástroje
- Aby bylo dosaženo dobrého těsnění, musí být zajištěn vysoký přidržovací tlak
- Potřebná tažná síla je navýšena o velikost protitlaku kapaliny



Obr. 22 hlubotažené součásti s využitím kapaliny [5]

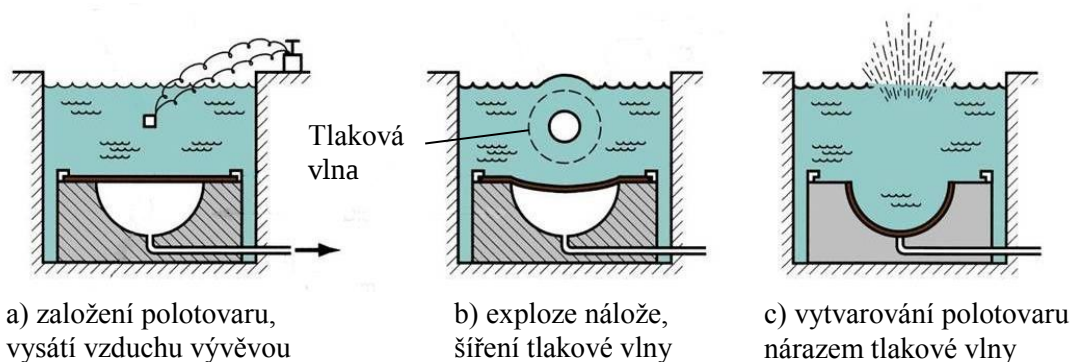
5 EXPLOZIVNÍ TVÁŘENÍ [2], [3], [7], [15], [16], [18], [28], [29], [31]

Podstata této metody spočívá v nahrazení síly lisu, působícího na tvářený materiál, účinkem tlakové vlny generované výbuchem. Účinek tlakové vlny je závislý na množství a druhu použité průmyslové výbušniny, respektive její detonací rychlosti a hustotě prostředí, které je nosičem tlakové vlny. V tomto případě je nosičem kapalina, jež je jako prostředí nejpoužívanější (lze využívat i expanzi plynů nebo nosič v podobě písku). Soustředění tlakové vlny na plochu materiálu se mění se vzdáleností H umístěné výbušniny od polotovaru. Na obr. 23 lze vidět uspořádání stroje, nástroje a polotovaru těsně před detonací výbušniny.



Obr.23 Připravená metoda k tváření [29]

Před explozí nálože je nutné z pracovního prostoru nástroje odsát vývěvou, o průměru d , vzduch. Pokud by v tomto prostoru zůstal vzduch o atmosférickém tlaku, který by při takto rychlém tváření neměl čas opustit vývěvou prostor mezi polotovarem a formou, působil by svým tlakem proti směru tváření a znehodnotil by tím výtažek (vyrobil by se zmetek). V okamžiku výbuchu se rázová vlna v kapalině šíří vysokou rychlostí a při nárazu do polotovaru jej deformuje. Polotovar je vysokou, kritickou rychlostí vtlačován do dutiny nástroje. Vzhledem k vysoké tvářecí rychlosti je zpětné odpružení materiálu téměř nulové a je dosaženo výborné přesnosti výlisku. Velikost výlisků tvářených touto metodou je teoreticky neomezená.



Obr.24 Tváření explozí v otevřeném systému [18]

Explozivní tváření lze provádět v otevřeném i uzavřeném systému. U otevřeného systému je forma umístěna pod výbušninu a tlaková vlna od exploze je využita jen v jednom směru viz Obr. 24. V případě uzavřeného systému forma obklopuje polotovar a výbušnina je umístěna v jeho středu.



Obr.25 vertikální komora [15]



Obr.26 horizontální komora [15]

V dnešní době se při tváření výbuchem používají průmyslové výbuchové komory. Jsou to automatická strojní zařízení jež jsou schopna opakovaného použití, v ideálním případě i 10 000 až 100 000 výbuchů. Maximální síla výbuchu, pro který jsou konstruovány, je rovna velikosti 16kg TNT. Tyto masivní ocelové komory mají schopnost absorbovat a rozptýlit detonační a rázovou vlnu, výbuchové teplo a urychlené střepiny. Po výbuchu postupně vypouští stabilizované výbuchové zplodiny. Jak takové komory vypadají lze vidět na obr.25 a obr.26.

Větší součásti tvářené touto metodou, pro které je potřeba větší tvářecí energie, jsou zpracovávány ve velkých vybetonovaných nádržích. Tyto nádrže jsou primárně užívány na výrobu velkých dílů letadel jako je kokpit nebo turbína (viz obr. 29) a lodí.

Výbušniny jsou látky, které při dodaném impulsu prochází rychlou chemickou reakcí, při níž vytváří teplo a velké množství plynných produktů. Výbušniny jsou pevné (TNT – trinitrotoluen...), kapalné (Nitroglycerin...) a plynné (směs kyslíku a acetylenu...).

V zásadě jsou rozdělovány do tří skupin podle povahy výbuchové přeměny na střeliviny, třaskaviny a trhaviny.

Střeliviny jsou určeny do lovecké, sportovní a vojenské munice, kde při výbuchu předávají energii střelám a udělují jim tak pohyb. Jedná se o střelný prach, nitroglycerinové a nitrocelulózové prachy.



Obr.27 semtex [16]



Obr.28 trinitrotoluen [16]

Třaskaviny jsou používány výhradně na plnění rozbušek a kapslí. Tyto látky mají vysokou citlivost na většinu impulsů. Při kontaktu s plamenem začínají ihned hořet a po chvíli vybuchují. Nejčastěji používané látky jsou třaskavá rtuť, azid olovnatý, azid stříbrný, dinol. Využívají se pro detonaci méně citlivých výbušnin, jako jsou trhaviny.

Trhaviny jsou pro svou velmi nízkou citlivost na mechanické podmínky značně bezpečné, a proto se běžně využívají v průmyslu. Dobrým příkladem je právě tváření explozí. Jejich detonaci lze zajistit pouze pomocí rozbušky nebo detonací jiné trhaviny. Jejich výbuch má velký destrukční účinek, typickými představiteli této skupiny jsou TNT (trinitrotoluen), Hexogen, Pentrit a Dynamit apod.

Na obr.27 a obr.28 jsou trhaviny běžně používané při tváření výbuchem a v tab.1 je několik příkladů s jejich vlastnostmi. Používané trhaviny potřebují k detonaci rozbušku.

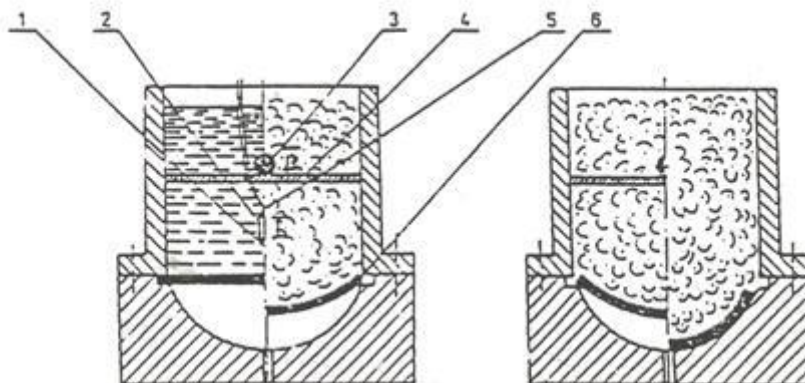
Tab.1 Průmyslové výbušniny a jejich vlastnosti

Výbušnina	Relativní výkon, %TNT	Forma výbušnin	Rychlost detonace, m/s	Energie, KJ/kg	Maximální tlak, GPa
RDX (cyclotrimethylene trinitramine, $C_3H_6N_6O_6$)	170	Lisované granule	8380	1270	23,4
TNT (trinitrotoluene, $C_7H_5N_3O_6$)	100	krystalická	7010	780	16,5
PETN (Pentaerythritol tetranitrate, $C_5H_8N_{12}O_{14}$)	170	Lisované granule	8290	1300	22,1
Tetryl (trinitrophenylmethylnitramine, $C_7H_5O_8N_5$)	129	Lisované granule	7835	---	---
Trhací želatina	99	rosolovitá	7985	1220	17,9



Obr.29 Ukázka výrobků vylisované metodou explozivního tváření [28]

Součásti velkých objemů, jež jsou tvářeny silou výbuchu jsou zobrazeny na obr. 29. Jedná se zejména o velké součásti jako je kokpit letadla, velké části leteckého motoru apod. Tvarově složitější velké součásti je mnohdy nutné tvářet na několik po sobě jdoucích výbuchů. Obr. 30 zobrazuje, jak výbuch první nálože začíná deformovat polotovar položený na formě a druhá exploze další výbušniny jej přesně dotvaruje dle tvaru formy.



1 – I. nálož, 2 – rozbuška, 3 – II. nálož, 4 – přihrádka 5 - zápalnice, 6 – plech
obr. 30 tažení na dvě operace [29]

➤ Výhody

- Minimální odpružení materiálu (velmi přesné rozměry)
- nižší náklady na nástroje
- lze zpracovávat i těžko tvařitelné materiály
- Je možné tvářet velmi rozměrné součásti

➤ Nevýhody

- Při tváření vzniká nadměrná hluková zátěž
- je nutné pracovat ve větší vzdálenosti od obydlených oblastí
- vznikají velké otřesy
- nízká produktivita práce
- práci může provádět jen pracovník, který je dobře proškolen v používání výbušnin
- nutnost zajistit správné uskladnění používaných trhavin a rozbušek a jejich zajištění proti krádeži

ZÁVĚRY

Tváření s využitím kapaliny má v dnešním průmyslu široké využití. Metody výroby dílů s pomocí tohoto nepevného nástroje jsou vhodnou volbou pro tváření většiny, ne-li všech, moderních materiálů. Největší zastoupení těchto technologií je v leteckém a automobilovém průmyslu.

V práci byla provedena literární rešerše na plošné tváření pomocí kapaliny, z ní vyplývá, že tyto metody mají oproti konvenčním metodám mnoho výhod. Lze jimi tvářet křehké a těžko tvaritelné materiály. Snižují počet tažných a mezižihacích operací. Součástí, které je nutné vyrábět postupně několika konvenčními metodami, lze nekonvenčním způsobem, který využívá kapalinu, vyrobit v jedné operaci. Čímž značně urychlují výrobu a snižují cenu součástí. Náklady na výrobu nástrojů jsou značně nižší, jelikož je jeden pevný nástroj nahrazen kapalinou. Je možné vyrábět tvarově velmi komplikované součásti.

Zavedení těchto způsobů tváření má i své nevýhody. Oproti výrobě konvenčními metodami jsou tyto metody technologicky složitější. Je potřeba speciálních strojů i nástrojů. Mnohdy je nutné i specializovaných pracovníků. Hydraulické obvody musí být precizně utěsněné a je nutná jejich častá údržba.

Ačkoliv jsou tyto technologie poměrně mladé, našly si již své stálé místo v průmyslu. Bohužel tyto způsoby výroby součástí nejsou v České republice příliš zastoupeny. Pořizovací náklady strojů na tento druh výroby jsou velmi vysoké a není zaručena blízká návratnost těchto investic.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [33]

1. BOLJANOVIC, Vukota a . *Sheet metal forming processes and die design*. Second edition. South Norwalk, CT 06854: Industrial Press, Inc., 2014, 293 s. 2. ISBN 978-083-1134-921.
2. ČADA, Radek. *Technologie I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1507-7.
3. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 3. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
4. LANGERAK, Nico, Dinesh Kumar ROUT, Arunansu VERMA, G. MANIKANDAN a Arunansu HALDAR. TATA STEEL RESEARCH DEVELOPMENT & TECHNOLOGY. *Tube Hydroforming in Automotive Applications*. India.
5. *Abelit LTD* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://177881.ua.all.biz/cs/hluboka-tazeni-s427699>
6. AVURE TECHNOLOGIES. [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://industry.avure.com/solutions/principle-flexform>
7. *ELUC* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://eluc.cz/verejne/lekce/2514>
8. ENPROTECH. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.enpromech.com/hydroforming-fluid-cell/>
9. *Forming* [online]. 2012 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://gps-forming.blogspot.cz/2012/08/hydroforming.html>
10. *GAZ Group* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.zspf.ru/en/services/gidroelastichnaya-shtampovka>
11. *GlobalMoto* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.globalmoto.cz/eshop-produktyznacky-20-176.html>
12. *Graebener Reika* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.gr-inc.com/products.php?product=tube-pipe-sheet-hydroforming>
13. *Hydroforming DESIGN LIGHT* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.designlight.se/en/platformning/pillow-hydroformning/>
14. H&H TUBE. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.h-htube.com/custom-hydroforming.html>
15. OZM RESEARCH S.R.O. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.ozm.cz/cs/>
16. *P.X.D.* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://canov.jergym.cz/vybusnin/PXD/cl/rozb_3.htm
17. *QFI, inc.* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.qfinc.com/processes/hydroforming.html>
18. *QUIA* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.quia.com/jg/1961543list.html>
19. *SAE International* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://articles.sae.org/5821/>

20. SIGMA-NETIC. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://sigmanetics.com/metal-bellows/hydroformed-metal-bellows>
21. SMITH, David A. *Fundamentals of pressworking*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 1994, xx, 416 p. ISBN 08-726-3449-3.
22. ŠANOVEC, . *Tvářecí a výrobní procesy ve stavbě lehkých karoserií*. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tvareci-a-vyrobní-procesy-ve-stavbe-lehkých-karoserií.html>
23. THE FABRICATOR. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/>
24. THYSSENKRUPP. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.thyssenkrupp-system-engineering.com/en/automotive-industry/dies/hydroforming-dies.html>
25. VARI-FORM. [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.vari-form.com/pressure-sequence-hydroforming/>
26. ZELLER+GMELIN. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.zeller-gmelin.cz>
27. ŽĐAS A.S. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.zdas.cz/cs/content.aspx?id=51>
28. *3D-Metal Forming* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.3dmetalforming.com/products/space-and-aerospace/airbus/>
29. *Technická univerzita Liberec* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/11.htm
30. *Technická univerzita Liberec* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm#095
31. *Metal Web News* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.metalwebnews.com/howto/explosive-forming/explosive-forming.html>
32. *Car Tuning* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://tuningpp.com/novita-da-hp-corse-per-la-naked-per-eccellenza-la-mv-agusta-brutale/media.motoblog.it*H*HPC*HPCorse_Hydroform_Brutale.jpg/www.motoblog.it*tag*Brutale/
33. CITACE PRO. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/dokument/qwyvmk8aIa5n2gce?kontrola=1>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
d	[mm]	průměr
F	[N]	lisovací síla
F _p	[N]	síla přidržovače
H	[mm]	výška
p	[MPa]	tlak
R	[mm]	poloměr
T	[mm]	tloušťka stěny

SEZNAM OBRÁZKŮ

- | | |
|---------|---|
| Obr. 1 | Součásti tvářené metodami využívající kapalné prostředí |
| Obr. 2 | metoda hydroforming |
| Obr. 3 | Speciální hydraulický lis CTV 16000 |
| Obr. 4 | výlisky vyrobené metodou hydroforming |
| Obr. 5 | Princip nízkotlakého hydroformingu |
| Obr. 6 | Příklad výrobků tvářených nízkotlakým hydroformingem |
| Obr. 7 | Tváření vysokotlakým hydroformingem |
| Obr. 8 | Zúžení stěny v rozích při použití vysokotlakého hydroformingu |
| Obr. 9 | Typické součásti tvářené vysokotlakým hydroformingem |
| Obr. 10 | Postupový hydroforming |
| Obr. 11 | profil stěny při použití postupového hydroformingu |
| Obr. 12 | Využití postupového hydroformingu |
| Obr. 13 | princip metody pillow hydroforming |
| Obr. 14 | Součásti vyrobené metodou pillow hydroforming |
| Obr. 15 | Metoda wheelon |
| Obr. 16 | ukázka stroje a výrobky metody wheelon |
| Obr. 17 | princip metody flexform |
| Obr. 18 | součásti tvářené metodou flexform |
| Obr. 19 | princip hydromechanického tažení |
| Obr. 20 | detail tažení |
| Obr. 21 | Stroj s nepevným nástrojem určený k hlubokému tažení |
| Obr. 22 | hlubotažené součásti s využitím kapaliny |
| Obr. 23 | Připravená metoda k tváření |
| Obr. 24 | Tváření explozí v otevřeném systému |
| Obr. 25 | vertikální komora |
| Obr. 26 | horizontální komora |
| Obr. 27 | semtex |
| Obr. 28 | trinitrotoluen |
| Obr. 29 | Ukázka výrobků vylisované metodou explozivního tváření |
| Obr. 30 | tažení na dvě operace |

