

Hydraulický ráz a jeho aplikácie v tvárnení

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
 Žilinská univerzita v Žiline,
 Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
 E-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2764

Hydraulic shock and its applications in forming

Abstract: The presented paper discusses the issue of the possibility of forming metals using hydraulic shock. The first part of the text presents the necessary theoretical knowledge about the issue. The second part presents some solutions of this advanced metal forming technology.

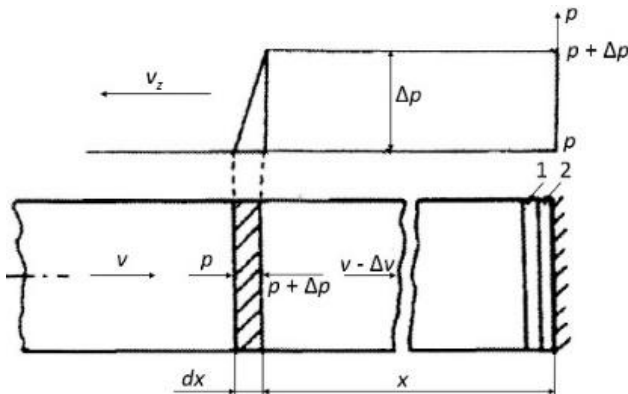
Keywords: forming, hydraulic shock, liquid.

ÚVOD

Neustále v každej oblasti ľudskej činnosti pri priemyselne výrobe sú hľadané nové, resp. Také možnosti, ktoré vyhovujú daným podmienkam po stránke technologickej a najmä ekonomickej. Jedna z takýchto ciest ku skvalitneniu výroby vedie aj cez hydrotvárnenie.

1 TEORETICKÉ PODMIENKY

Jav náhleho zatvorenia potrubia sa nazýva *hydraulický ráz*. Pri náhlom zastavení prúdu kvapaliny klapkou (náhlejš zmeňe rýchlosti, vyvolanej rýchlym priškrtením ventilu) sa uplatní stlačiteľnosť kvapaliny. Obrázok 1 schematicky znázorňuje proces stlačenia kvapaliny počas hydraulického rázu [1-3].



Obr. 1. K analýze hydraulického rázu

Vrstvička kvapaliny 1, nachádzajúca sa bezprostredne na stene klapky, sa na nej zastaví. Na vrstvičke 1 sa potom zastaví vrstvička 2 atď., až jav zastavovania vrstvičiek dorazí do miesta vzdialeného x od klapky. Na vrstvičku s hrúbkou dx , ktorá sa práve zastavuje, môžu pôsobiť mimo sily tiaže a trenia o steny potrubia (ktoré sa zanedbávajú ako sily veľmi malé), iba sily od tlaku kvapaliny z oboch strán vrstvičky, na priereze

potrubia S . Pri označení ich výslednice F (kladná v smere x):

$$dF = (p + dp) \cdot S - p \cdot S = S \cdot dp. \quad (1)$$

Z rovnice pre impulz sily:

$$F \cdot dt = m \cdot dv \quad (2)$$

sa dá jav zastavovania popísať tak, že sila dF účinkujúca po určitú dobu dt na element kvapaliny v úseku potrubia dx , zmení jeho rýchlosť o dv . Ak sa ďalej zväží, že:

$$dm = \rho \cdot S \cdot dx \quad (3)$$

a z rovnice (1) vyplýva:

$$dp \cdot S \cdot dt = \rho \cdot S \cdot dx \cdot dv \quad (4)$$

Potom sa vyjadří Δp a označí sa výraz:

$$\frac{dx}{dt} = v_z \quad (5)$$

ako *rýchlosť tlakovej vlny* (šírenia sa zvuku v kvapaline), keďže dx má význam posunutia sa javu zastavovania a susedný element kvapaliny za dobu dt . Stúpnutie tlaku Δp sa nasledujúco dá vyjadriť vzťahom:

$$dp = \rho \cdot dv \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot v_z \cdot dv, \quad (6)$$

$$\Delta p = \rho \cdot v_t \cdot \Delta v. \quad (7)$$

Podľa obr. 2 sa dá presne popísať správanie sa tlakovej vlny v potrubí. Okamih náhleho zatvorenia potrubia v bode 2 sa vyznačuje tým, že v celom potrubí je rýchlosť v a $\Delta p = 0$. Tlaková vlna sa šíri k nádrži (1). Po dorazení vlny do bodu 1 (fáza 2) vrstvička kvapaliny bude v rovnováhe a posunie sa smerom do nádrže. To sa bude opakovať s ďalšími vrstvičkami, čo sa prejaví vznikom vlny poklesu tlaku na pôvodnú úroveň (3) a kvapalina potečie do nádrže. Vlna dorazí k uzáveru (4), vrstvička kvapaliny na

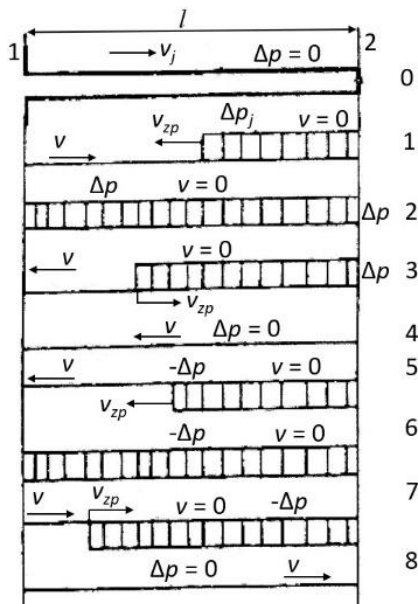
uzáveru bude stáť a zostanú stáť aj susedné vrstvičky. Na ich zastavenie je treba pretlak zo strany od nádrže. Musí teda vzniknúť vlna podtlaku, šíriaca sa od uzáveru (5). Táto vlna dorazí do bodu (6), odkiaľ sa odrazí ako vlna vyrovnania tlaku (7). Keď táto vlna dorazí k uzáveru, vznikne fáza javu veľmi blízka počiatkovej fáze javu (0). Z naznačeného popisu vyplýva opakovanie sa popísaného javu s periódou:

$$T = 4 \cdot \frac{l}{v_{zp}} \quad (8)$$

Uplatní sa pritom väzkosť kvapaliny i odpor proti deformácii potrubia, čo spôsobí, že amplitúda tlakov bude klesať a jav zanikne (tlmené kmitanie).

Totálnym hydraulickým rázom sa nazýva jav, keď zmena rýchlosti Δv nastane v čase Δt kratšom, než vlna vyrovnania tlaku dorazí k uzáveru (fáza 4). Pre čas Δt musí platiť:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot L}{v_{zp}} \quad (9)$$

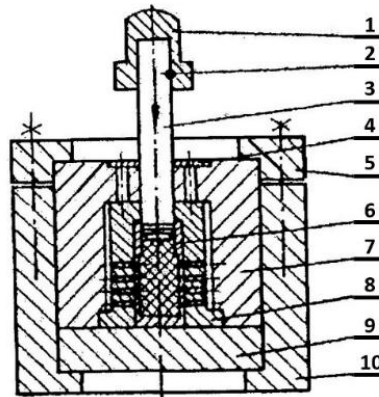


Obr. 2. Správanie sa tlakových vln v potrubí

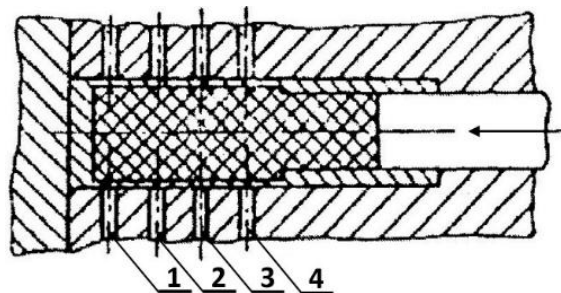
V mieste uzáveru vtedy nastane maximálne stúpnutie tlaku odpovedajúce rovnicam 6 a 7. V opačnom prípade odrazená vlna ovplyvní tlakové pomery v bode 2 a stúpnutie tlaku bude menšie.

Z uvedeného vyplýva, že v rázovo zaťažených kvapalinách alebo čisto plastických médiách vznikajú hydraulické rázy. V hydraulických konštrukciách pôsobia nepriaznivo, ale v oblasti impulzného zaťaženia, napr. pri tvárnení kovov, ich možno použiť tak, že rázová vlna tvorí jednu polovicu činnnej časti nástroja. Účinky všestranných hydrostatických tlakov spôsobujú prírastky tvárnosti. Výskumy potvrdili výrazný vzrast tvárnosti po prekročení prahového tlaku p_{pr} , pričom možno tvárniť aj materiály ťažko tváriteľné vrátane nástrojových ocelí triedy 19 s vysokým stupňom pretvorenia v

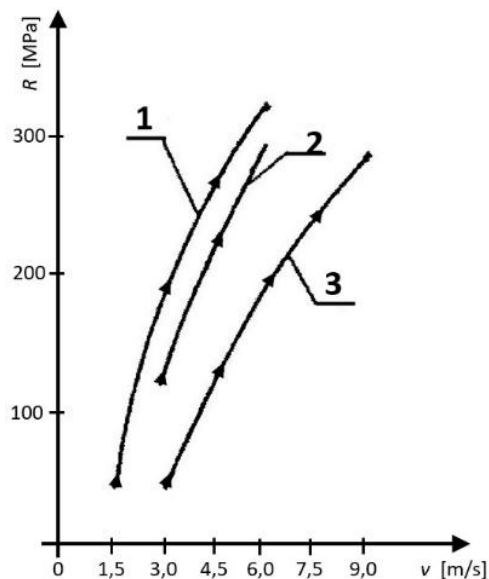
jednej operácii. Technická aplikácia synchronného účinku všestranného tlaku a rázovej rýchlosti zaťaženia sa riešila využitím hydrodynamických rázov v kvapalinách. Experimentálne sa na zariadení znázornenom na obr. 3 potvrdil predpoklad použitia hydraulického rázu ako zdroja vysokých tlakov a aj činiteľ zabezpečujúci synchronizáciu tlakového a úderového tvárnenia.



Obr. 3. Vysokotlakové zariadenie: 1 - hlavica, 2 - košík, 3 - piest, 4 - podložka, 5 - veko, 6 - skúšobná vzorka, 7 - puzdro, 8 - delené puzdro, 9 - oporná platňa, 10 - puzdro II



Obr. 4. Skúšobný priestor vysokotlakového zariadenia: 1, 2, 3, 4 - meracie otvory



Obr. 5. Priebeh aproximovaných hodnôt hydrodynamických tlakov

V skúšobnom zariadení sa pri experimentoch dosiahli tlaky až 350 MPa, pričom tieto tlaky spôsobil úder

barana pádostroja, ktorý mal hmotnosť 6 kg a rýchlosť $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pri statickom zaťažení bolo potrebné vyvinúť osovú silu zaťažovania 27 150 N. Na obr. 3 je detail skúšobného priestoru vysokotlakového zariadenia a na obr. 5 grafický priebeh aproximovaných hodnôt hydrodynamických tlakov a závislostí od rýchlosti pohybu barana pre rôzne hodnoty hmotnosti barana pádostroja. Hydrodynamické tvárnenie zabezpečuje synchronizáciu účinkov tlakového vysoko rýchlostného tvárnenia. Hydraulický ráz spôsobený úderom barana na lisovací piest možno použiť ako lacný, energeticky málo náročný zdroj dynamických tlakov. Hydrodynamické tlaky, ktoré vznikajú hydraulickým rázom sú radovo rovnaké, ako tlaky používané pri hydrostatickom tvárnení. Hydrodynamické tvárnenie, pretože spája výhody tlakového a úderového tvárnenia, má veľké predpoklady aplikácie v strojárskych praxi.

V mieste uzáveru vtedy nastane maximálne stúpnutie tlaku zodpovedajúce vzťahu (2). V opačnom prípade odrazená vlna ovplyvní tlakové pomery v bode 2 a stúpnutie tlaku bude menšie.

2 APLIKÁCIE HYDRAULICKÉHO RÁZU

Vzťah (2) sa môže písať po úprave v tvare:

$$\Delta p = \pm \rho \cdot C_z \cdot C, \quad (10)$$

kde C - rýchlosť zaťaženia,

C_z - rýchlosť zvuku (rozruchu).

Absolútna hodnota prírastku tlaku závisí od hustoty, zmeny rýchlosti zaťaženia a rýchlosti šírenia rozruchu v tlakovom médiu. Rýchlosť rozruchu v tlakovom médiu nie je obyčajne konštantná veličina, ale premenlivá v závislosti od vlastností média a jeho usmernenia geometriou nádoby [4-8]. Hodnota rýchlosti rozruchu, čiže šírenia tlakovej vlny pružným médiom pri zohľadnení pružnosti tlakovej nádoby sa vypočíta zo vzťahu:

$$C_z = \sqrt{\frac{E \cdot g \cdot v_m}{E \cdot v \cdot D} \cdot C}, \quad (11)$$

kde g - tiažové zrýchlenie,

E_v - modul objemovej pružnosti média,

v_m - merný objem,

D - priemer tlakovej nádoby,

s - hrúbka steny tlakovej nádoby,

E - modul pružnosti v ťahu materiálu tlakovej nádoby.

Z analýzy vzťahu (4) vyplýva, že na dosiahnutie maximálnej rýchlosti rozruchu je nevyhnutné, aby hodnota menovateľa vo vzťahu (4) bola blízka 1, čo je vtedy, keď tlaková nádoba je dokonale tuhá. Vzťah (2, resp. 3) vyjadruje tlakovú zmenu v dôsledku náhle

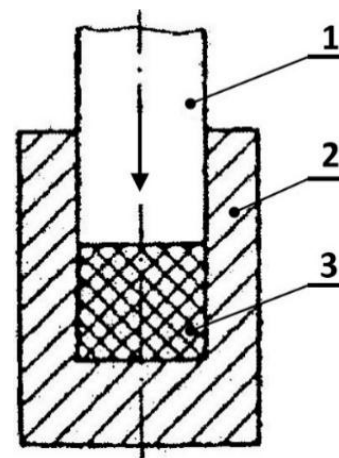
zmeny pohybu média až po anulovanie prúdenia. Hydraulický ráz podľa vzťahu (2, 3) vznikne vtedy, ak zastavenie média nastane v kratšom čase ako perióda kmitu T daná vzťahom:

$$T = \frac{2 \cdot e}{C_z}, \quad (11)$$

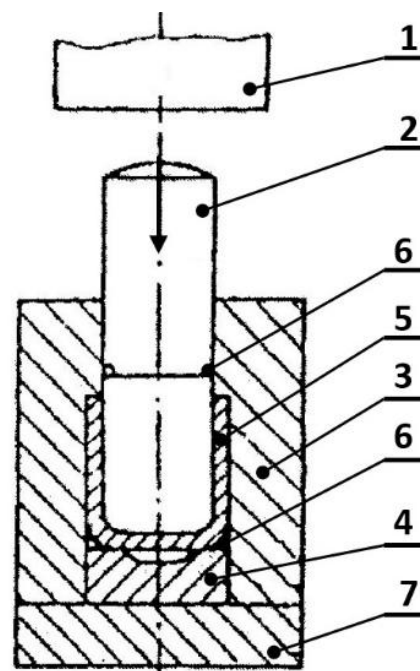
kde l je dĺžka nádoby v smere chodu média.

Tlaková zmena vznikne aj vtedy, ak časť pohybujúceho sa média jednostranne nahradí tuhý lisovník, ktorý po ráze naň náhle zastaví (obr. 6). Tlaková zmena spôsobená úderom lisovníka s hmotnosťou m pohybujúceho sa rýchlosťou v_0 sa určí zo vzťahu:

$$p_{zt} = v_0 \cdot \sqrt{\frac{E_v \cdot v_m}{v_0}}. \quad (12)$$



Obr. 6. Nahradenie kvapaliny lisovníkom: 1 - lisovník, 2 - tlaková komora, 3 - tlakové médium



Obr. 7. Princíp tvárnenia hydraulickým rázom: 1 - baran tvárniaceho stroja, 2 - lisovník, 3 - tlaková nádoba, 4 - opora s tvárniacou dutinou, 5 - polovýrobok, 6 - tesnenie, 7 - podložka

Zmena tlaku vo vzťahu (12) závisí aj od modulu objemovej pružnosti E_v použitého tlakového média a od objemu tlakovej komory v_0 . Z analýzy vzorca (12) vyplýva, že objem média v tlakovej komore sa prejavuje ako faktor, ktorý znižuje tlakové hodnoty. Vo vzorci (12) je opísaná tlaková zmena, ktorá nastane v tlakovej komore pri náhlom zastavení pohybujúceho sa lisovníka nárazom o tlakové médium. Podobná tlaková zmena vznikne aj vtedy, ak je tlakové médium uzavreté v tlakovej komore lisovacím piestom, ktorému sa udelil impulz ráznym účinkom barana vysoko rýchlostného tvárniaceho média. Tlaková zmena, ktorá vznikne v tlakovej komore sa využíva v tvárnení. Princíp tohto spôsobu je schematicky znázornený na obr. 6.

ZÁVER

V príspevku bolo podané vysvetlenie problematiky vodného rázu a uvedené boli niektoré aplikácie tohto javu. Dôležitým problémom a jeho riešením je stanoviť veľkosť tlakových zmien v ľubovoľnom profile potrubia a stanovenie ich závislosti od času a od polohy uvažovaného profilu.

LITERATÚRA

- [1] SMETANA, J. (1977): *Hydraulika 2*. NČSAV, Praha.
- [2] MORAVEC, J. (2016): *Hydrotvárnenie*. EDIS-vydavateľstvo UNIZA, ISBN 978-80-554-1205-4.
- [3] MORAVEC, J. (2011): *Nekonvenčné metódy tvárnenia*. EDIS-vydavateľstvo UNIZA, ISBN 978-80-554-0389-2.
- [4] HENRYCH, J. (1980): *Vlastnosti tekutín*. ALFA-SNTL Bratislava, Praha.
- [5] BOLJANOVIC, V. (2004): *Sheet metal forming Processes and Die Design*. Industrial Press, NY, ISBN 0-8311-3182-9
- [6] PEARCE, R. (2010): *Sheet Metal Forming*. ISBN 0-7503-0101-5.
- [7] MARCINIAK, Z. D.(2008): *Theory of Sheet metal forming*. Prague: Univ. Press. ISBN 978-1-107-00452-8.
- [8] VATER, M. - LIENHART, A. (1982): *Bänder, Bleche, Rohre*. 13, No.8.