

Tvárnenie v hydraulickom prostredí explóziou

Ján Moravec, doc. Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,

Univerzitná 1/8215 010 26 Žilina.

E-mail: jan.moravec@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2764, Fax.: + 421 41 525 2541

Formation in a hydroenvironment by explosion

Abstract: The article describes and analyses the issue of explosive sheet metal forming in a hydro environment. In the introductory part, the necessary theoretical and technological knowledge is presented, which is necessary as a theoretical introduction to the issue. The explosion process in a liquid environment is described. The reflection from the surface and bottom of the tank used in the experiment is important. The paper only offers a view of the theoretical side of the process, because the legislative framework does not yet allow direct experimental work to be carried out, which must be done by a certified specialist in the handling of explosives.

Keywords: forming, explosion, sheet metal, pressure wave reflection, liquid environment

1 ÚVOD

Tvárnenie plechov pomocou energie uvoľnenej detonáciou výbušnín je jednou z progresívnych technológií. Uvedená metóda však vyžaduje pre svoj ďalší úspešný vývoj dôkladné pochopenie podstaty tvárniaceho procesu, vymykajúceho sa veľkosťou deformačnej rýchlosti a počiatočných parametrov energetického zdroja doposiaľ bežným meradlám. Prehlbovanie znalostí v tomto smere je však viazané prednostne na uplatnenie poznatkov o šírení rázových vln plniacich úlohu tvárniaceho nástroja [1].

Najpoužívanejším prenosovým prostredím býva voda. Tvárnenie prebieha buď v stabilnej vodnej nádrži, alebo sa potrebný vodný stĺpec získa naplnením napr. polyetylénového vaku vodou. V každom prípade môžu ovplyvniť tvárniaci pochod odrazy rázových vln od dna a stien nádrže a od hladiny. Minimálna, resp. dostatočná výška vodného stĺpca je potom dôležitá z hľadiska optimálneho využitia energie výbušniny. Príspevok sa venuje tomuto problému a uvádza výpočet nutnej výšky hladiny spolu so zisťovaním veľkosti zosilnenia účinku pri odraze od dna a stien nádrže.

1.1 Odborné pramene k problematike

Pre analyzovanie uvedenej oblasti sú k dispozícii ako vstupné zdroje, ktoré predstavujú dostatočnú základňu pre nasledujúce výskumy. Sféra plošného tvárnenia sa ukazuje ako schodná pre takéto pôsob spracovania kovov [1-3].

Aplikovaním hydrotvárnienia vo sfére strojárskych výroby sa zaoberajú zdroje a takisto preberajú a prinášajú potrebné poznatky [6-8, 10-12, 14-16].

Dôležitá je pri tomto takisto analýza problematiky odrazu tlakovej vlny os stien a dna nádrže. Dôležité výpočty a opisy týchto javov sú zhrnuté v [4-5, 7-8, 13].

2 ROZBOR PROBLÉMU

2.1 Technológia tvárnenia explóziou

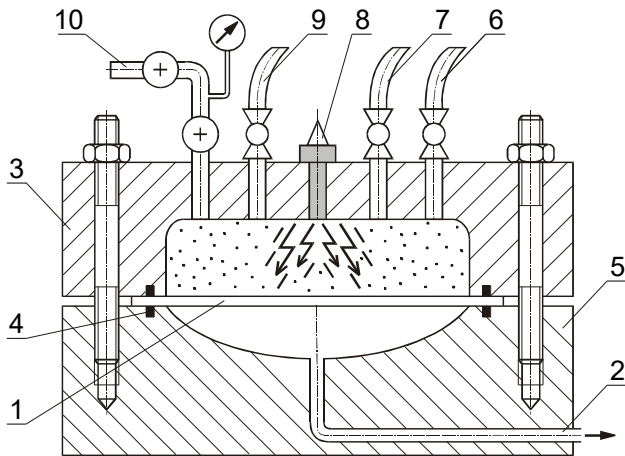
Táto technológia je určená ako bolo uvedené, pre tvárnenie pevných materiálov najmä plechov, ktoré sa nedajú tvárniť obvyklými spôsobmi. Veľká tvárniaca rýchlosť pôsobením explozívnych tlakov odstraňuje ťažkosti pri spracovaní týchto materiálov. Tvárnenie explóziou sa dá rozdeliť na dve skupiny (metódy):

Prvá využíva tlak vzniknutý spálením, napr. pušného prachu, v uzavretom priestore. Vzniknutý tlak pôsobí na plech ako kvapalina pri hydrotvárnení. Plech musí byť dobre utesnený a z dutiny lisovnice je potrebné vyčerpať vzduch. Spôsob je vhodný pre výrobu veľkých výtlačkov v malých sériách. Na výrobu stačí lisovnica zhotovená z dreva, plastu alebo betónu.

Druhá metóda využíva prenos tlakovej vlny vzniknutej pri explózii pomocou kvapaliny. V lisovnici je utesnený plech a nad ním je kvapalina (zvyčajne voda) s určitou výškou vodného stĺpca. Rozborom tohto sa zaoberá nasledujúca časť príspevku. Vo vode je vhodne umiestnená trhavina, ktorá sa odpáli elektrickou iskrou. *Podmienka:* rešpektovanie príslušných predpisov (zákon o zbraniach a streľive), bezpečnosť práce a z konštrukčného hľadiska musí byť nástroj dostatočne tuhý a pevný.

Na doplnenie je na obr. 1 schéma nástroje pre

tvárnenie explóziou s použitím výbušných zmesí plynov. Výbušná zmes (zvyčajne $H_2 + O_2$) sa zapáli elektrickou iskrou v upravenej hlave nástroja a utesnený plech sa tvárni v tvárnici do požadovaných parametrov.



Obr. 1. Schéma nástroja pre tvárnenie explóziou: 1 - tvárnený materiál, 2 - odsávanie vzduchu, 3 - zmiešavacia komora, 4 - tesnenie, 5 - tvárnica, 6 - prívod horľavého plynu (výbušniny), 7 - prívod kyslíka, 8 - zapalovanie, 9 - vyplachovací ventil, 10 - výfuk.

2.1.1 Explózia vo vodnom prostredí

Pri detonácii guľovej výbušniny vo vode vznikne rázová vlna, ktorej amplitúdu p_{max} v ľubovoľnej vzdialenosti R od centra výbuchu možno popísať vzťahom vychádzajúcim zo zákona geometrickej podobnosti:

$$p_{max} = A \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right)^\alpha, \quad (1)$$

kde p_{max} - tlak na čele rázovej vlny,

R - vzdialenosť [m];

G - hmota [kg];

A, α - konštanty, ktoré charakterizujú danú výbušninu a prenosové prostredie.

Ako bolo experimentálne dokázané [2, 3], možno pokles tlaku v závislosti od času v rázovej vlně vyvolané detonáciou vyjadriť exponenciálnou funkciou v tvare:

$$p(t) = p_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

kde t - čas meraný od okamihu priechodu čela rázovej vlny daným bodom,

τ - časová konštanta (konštanta útlmu), ktorá charakterizuje pokles tlaku v závislosti od času.

Platí:

$$-\frac{1}{\tau} = \frac{\partial p}{\partial t} \cdot \frac{1}{p}. \quad (3)$$

Dôležitou charakteristikou rázovej vlny je špecifický impulz I_{sp} , ktorý je daný výrazom:

$$I_{sp} = \int_0^{\tau} p(t) \cdot dt, \quad (4)$$

kde τ - doba trvania rázovej vlny.

Dosadením (2) do (4) bude:

$$I_{sp} = p_{max} \cdot \int_0^{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot dt. \quad (5)$$

V integráli vzorca (5) sa môže horná medza τ nahradiť ∞ bez dopustenia sa veľkej chyby, pretože tlak v zadnej časti vlny je po dobe $t \approx (5 \div 7) \cdot \tau$ zanedbateľný. Riešením potom vychádza:

$$I_{sp} = p_{max} \cdot \tau. \quad (6)$$

Pri dopade rázovej vlny na rozhraní sú pomery charakterizované podmienkami:

$$u_1 - u_2 = u_3 \quad (7)$$

a

$$p_1 + p_2 = p_3, \quad (8)$$

kde u - rýchlosť častíc prostredia,

p - tlak na čele rázovej vlny.

Indexy 1, 2, 3 označujú parametre dopadajúcej, odrazenej a prejdenej vlny.

Exaktné riešenie výpočtu odrazeného a prejdeneho tlaku je náročné. Pri rázových vlnách šíriacich sa v málo stlačiteľnom prostredí sa môže použiť tzv. akustické priblíženie, pri ktorom sa zanedbáva zmena rýchlosti šírenia čela rázovej vlny s tlakom. Zavedením tejto aproximácie pre vodu sa pre nie príliš vysoké tlaky (rádovo 100 MPa) neurobí veľká chyba. Odrazený a prejdený tlak sa potom bude rovnať pri kolmom dopade rázovej vlny na rozhraní [3, 4, 6, 7, 13]:

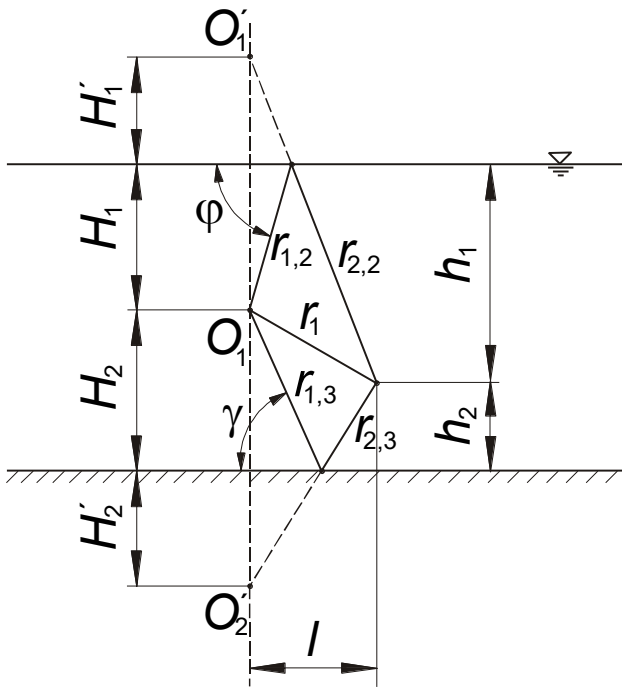
$$p_2 = \frac{\rho_1 \cdot c_1 - \rho_0 \cdot c_0}{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_0 \cdot c_0} \cdot p_1, \quad (9)$$

$$p_3 = \frac{2 \cdot \rho_1 \cdot c_1}{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_0 \cdot c_0} \cdot p_1, \quad (10)$$

kde ρ_1, c_1 - hustota a rýchlosť zvuku v prostredí, do ktorého sa rázová vlna šíri,

ρ_0, c_0 - hustota a rýchlosť zvuku v pôvodnom prostredí.

Podobný rozbor otázok, súvisiacich s odrazom rázových vln od hladiny a dna nádrže, je v [3-5, 7, 8]. Do tlakov na čele rázovej vlny 100 MPa je možné pre riešenie tejto úlohy použiť jednoduchú geometrickú interpretáciu, ktorá vyplýva z akustického priblíženia. Na obr. 2 je schematicky znázornený odraz rázovej vlny od hladiny a odo dna nádrže. Doba, počas ktorej bod M nebude ovplyvnený odrazom od hladiny a odo dna, ale len vystavený účinku dopadajúcej rázovej vlny, bude daná časovým rozdielom medzi príchodom dopadajúcej a odrazenej vlny. Tento časový rozdiel bude tým väčší, čím väčšia je vzdialenosť náložky a bodu M od hladiny a dna (alebo steny) nádrže.



Obr. 2. Schéma odrazu rázovej vlny od hladiny a dna nádrže: O - centrum výbuchu, M - bod merania

3 ODRAZ OD HLADINY

Pri uvažovaní rozhrania voda - vzduch zo vzorca (9) vyplýva, že pri odraze na tomto rozhraní vznikne vo vode ťahové napätie. Experimentálne merania síce ukázali, že pri určitých podmienkach je voda schopná zniesť ťahové napätie až 28 MPa, avšak normálne dochádza ku kavitácii a rýchlemu poklesu tlaku na atmosférický [3, 4]. Odraz na hladine sa prejaví teda tým, že v okamihu príchodu odrazenej vlny do daného bodu dôjde k poklesu tlaku v dopadajúcej (primárnej) rázovej vlně.

Časový rozdiel Δt_1 medzi príchodom dopadajúcej vlny a vlny odrazenej od hladiny bude daný približne výrazom:

$$\Delta t_1 = \frac{1}{c_0} \cdot [(R_{1,2} + R_{2,2}) - R_1] = \frac{1}{c_0} \cdot \left[\sqrt{L^2 + (H_1 + h_1)^2} - \sqrt{L^2 + (h_1 - H_1)^2} \right], \quad (11)$$

kde c_0 - rýchlosť zvuku vo vode,

L - vzdialenosť kolmých priemetov náložky a daného bodu na hladinu,

H_1 - vzdialenosť náložky od hladiny,

h_1 - vzdialenosť sledovaného bodu od hladiny.

Špecifický impulz dopadajúcej rázovej vlny I_{1sp} sa vypočíta zo vzťahu (neberie sa do úvahy ovplyvnenie odrazom od dna stien):

$$I_{1sp} = p_{1max} \int_0^{\Delta t_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} dt = p_{1max} \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{\tau_1}} \right). \quad (12)$$

Po dosadení vzťahu (1) do (12), vyjde konečný výraz pre špecifický impulz v tvare:

$$I_{1sp} = A \cdot \left[\frac{\sqrt[3]{G}}{\sqrt{L^2 + (h_1 - H_1)^2}} \right]^\alpha \cdot \tau_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{\tau_1}} \right). \quad (13)$$

Zo vzorca (13) vyplýva, že I_{1sp} bude ovplyvnený odrazenu vlnou od hladiny, ak bude $\Delta t_1 < (5 \div 7) \cdot \tau_1$. Toto približné riešenie vyhovuje len pokiaľ odraz od hladiny je normálny, to znamená, ak je uhol dopadu rázovej vlny na hladinu $\alpha \geq \alpha_{kr}$, α_{kr} je kritický uhol.

Platí:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{H_1 + h_1}{L} \right), \quad (14)$$

$$\alpha_{kr} = p_1 \cdot \sqrt{\frac{n+1}{2 \cdot n \cdot B}},$$

kde n a B sú konštanty (pre vodu $n = 7,15$, $B = 304,5$ MPa).

Pri $\alpha < \alpha_{kr}$ dochádza k nepravidelnému odrazu a akustické riešenie nie je možné použiť. Z tohto rozboru vyplýva, že nedodržanie potrebnej výšky hladiny nad náložou výbušniny bude mať za následok podstatné zníženie účinku, a teda rovnako nižší koeficient využitia energetického zdroja.

ZÁVER

V článku bolo poukázané na problematiku tvárnenia explóziou, ktorá sa akosi dostala do úzadia a jedným z cieľov príspevku bolo aj upozorniť na túto vysoko produktívnu technológiu tvárnenia s minimálnymi nákladmi na výrobu. Prínos takéhoto riešenia je v odstránení vysokej prácnosti na výrobu nástroja pri použití jednoduchých metód výroby častí nástroja.

LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2016): *Hydrotvárnenie, Hydroforming*. EDIS vyd. ŽU v Žiline, ISBN 978-80-554-1205-4.
- [2] MORAVEC, J. (2003): *Nekonvenčné technológie tvárnenia kovov*. ŽU v Žiline, ISBN 80-8070-094-X.
- [3] VACEK, J. (1975): *Rozbor vlivu rozměru vodní nádrže na energii rázové vlny při tváření plechů*. Strojirenství 17/9.
- [4] HENRYCH, J. (1983): *Dynamika výbuchu a její užití*. Academia Praha.
- [5] BERÁNEK, J. (1984): *Tváření výbuchem*. Práce Praha.
- [6] MORAVEC, J. (2011): *Nekonvenčné metody tvárnenia*. EDIS vyd. ŽU v Žiline, ISBN 978-80-554-0389-2.
- [7] BREPTA, R. - PROKOPEC, M. (1972): *Šíření napěťových vln a rázy v tělesech*. ACADEMIA Praha.

- [8] BREPTA, R. (1980): *Šíření podélných vln v diskrétních homogénních řetězcích*. Výzkumná zpráva ÚT- ČSAV.
- [9] HRIVŇÁK, A. - POLÁK, K. (1989): *Teória tvárnenia a nástroje*. ALFA Bratislava.
- [10] HRIVŇÁK, A. - PODOLSKÝ, M. - DOMAZETOVÍČ, V. (1992): *Teória tvárnenia a nástroje*. ALFA Bratislava, ISBN 80-05-01032-X.
- [11] MACHEK, V. (1983): *Zpracování tenkých plechů*. SNTL Praha.
- [12] MORAVEC, J. (2005): *Využitie poznatkov z mechaniky tekutín v oblasti oobjemového tvárnenia kovov*. *Hydraulika a pneumatika*, VII. 1-2, str. 18-20, ISSN 1335-5171.
- [13] MORAVEC, J. (2006): *Odraz od hladiny na rozhraní voda - vzduch pri tvárnení explóziou v hydraulickom prostredí*. *Hydraulika a pneumatika*, VIII. 1-2, str. 63-64, ISSN 1335-5171
- [14] MORAVEC, J. (2006): *Prispevok ku problematike tvárnenia v hydroprostredí*. *Hydraulika a pneumatika*, VIII. 1-2, str. 55-57, ISSN 1335-5171.
- [15] MORAVEC, J. (2008): *Dopredné pretlačanie kovov v hydroprostredí*. *Zborník AENMT*, str. 343-348, ISBN 978-80-8070-826-9.
- [16] POLÁK, K. - KULÍŠEK, J. (1986): *Hydrodynamické tvárnenie kovov, Strojnícka ročenka 87, str. 136-140 Teória tvárnenia a nástroje*. ALFA Bratislava.