

# Tvárnenie plechu veľkou uvoľnenou energiou

**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

**Borislav Melo, Ing., PhD.**

Viena International, spol. s r. o.  
Dolné Kráčiny 2, 036 01 Martin  
E-mail: melo@viena.sk

## Sheet metal forming with high released energy

**Abstract:** The paper analyzes an unconventional method of forming sheet metal parts with high energy release. Published diagrams and images together with a physical description of the process illustrate how this technology can be applied to form large-sized sheet metal parts at low production costs. The text presents important mathematical equations that are part of the physical description together with technological parameters. A brief economic evaluation is presented in the conclusion.

**Keywords:** sheet, forming, energy, metal parts.

## ÚVOD

Percentuálny pokles zastúpenia väčších a veľkých podnikov priniesol zákonite pokles v reálnom vyjadrení počtu kusov výrobkov, t. j. došlo k zmene veľkosti sérií. Tento fakt núti výrobcov strojárskeho výrobu, najmä oblasť plošného tvárnenia, využívať intenzívnejšie tzv. „zabudnuté“ postupy výroby. Výrobca je nútený hľadať taký postup, aby dokázal všetky požiadavky splniť a efektívne využiť zvolenú alternatívu. Jednou z ciest v oblasti plošného tvárnenia je aj možnosť tvárnenia výbuchom.

Ťahanie kovov explozívnymi tlakmi je podmienené presným množstvom trhaviny na vykonanie požadovanej práce bez nežiaducej deformácie tvárneného kovu. Pri tvárnení kovov sa využíva nárazová vlna a tlak plynov vzniknutých pri explózií. Nízke výrobné náklady pri porovnaní s bežne používanými spôsobmi zvyhodňujú explozívne tvárnenie, zvlášť pre veľké súčasti.

Detonácia je vždy sprevádzaná vznikom tlakovej vlny v uzavretom i voľnom priestore. Efektívne tlaky plyných zmesí sú cca 2 MPa, tuhých látok alebo kvapalných látok 20 000 MPa. Detonácia je výbušná premena šíriaca sa rýchlosťou vyššou ako je rýchlosť zvuku vo výbušnom systéme.

Ak je tlak rovnaký v každom smere výbušného systému, je otáznou, či jeho veľkosť bude stačiť na trvalú deformáciu spracovávaného materiálu, t. j. vytvorenie požadovanej súčasti predpísaného geometrického tvaru a rozmerov. Ak je jeden smer neuzavretý, spätný pohyb uvoľnenej energie, ktorá sa

uvoľní odrazením tlakovej vlny od podložky, čiže odražača, dôjde k posunu na tej istej nositeľke, a energia je zväčšená o prírastky z ostatných smerov. Nevyhnutnou podmienkou je, že spracovávaný materiál nesmie byť pri procese poškodený.

## 1 VÝBUCH A JEHO PÔSOBENIE V PROSTREDÍ

Nech existuje prvok C, nachádzajúci sa v čele detonačnej vlny (obr. 1). Na obr. 1a je vyznačený stav v čase  $t$  a na obr. 1c stav v čase  $t + dt$ . Symbol  $D$  znamená, že daná veličina sa vzťahuje k rýchlosti čela detonačnej vlny,  $u_d$  - rýchlosť hmoty na čele detonačnej vlny. V súlade s obr. 1 je zákon zachovania hmoty v integrálnom tvare vyjadrený rovnicou:

$$D \cdot dF \cdot dt \cdot \rho_D = (D - u_D) \cdot dF \cdot dt \cdot \rho_D, \quad (1)$$

$$\text{takže } u_D = \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_D}\right).$$

Zákon zachovania hybnosti má tvar:

$$(p_D - p_w) \cdot dF \cdot dt = D \cdot dF \cdot dt \cdot \rho_w \cdot (u_D - 0), \quad (2)$$

$$\text{takže } p_D - p_w = \rho_w \cdot u_D \cdot D$$

kde  $\rho$  - hustota,

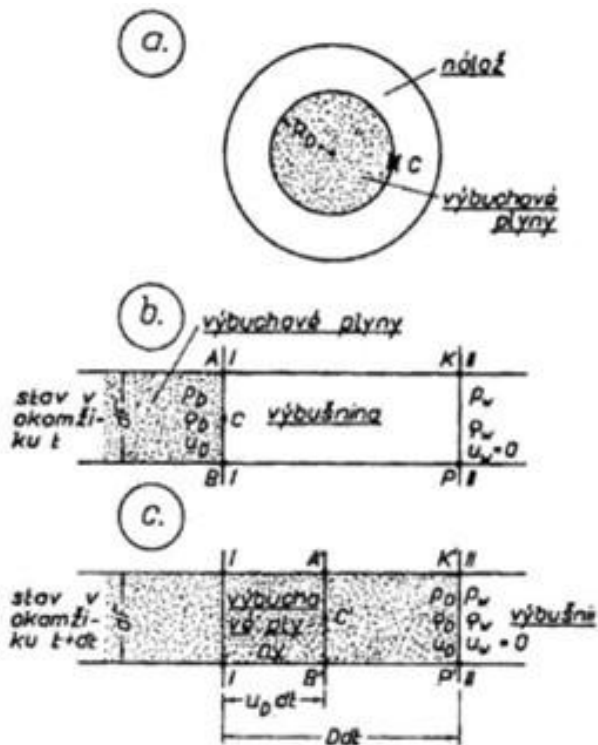
$p_D$  - tlak,

$p_w$  - tlak,

$\rho_w$  - hustota výbušniny,

$u_w$  - hmotová rýchlosť,

$E_w$  - vnútorná merná energia.



Obr. 1. Schéma sférického výbuchu: a) v čase  $t$ , b) výřez v okamihu  $t$ , c) výřez v okamihu  $t + dt$

Stavová rovnica udáva vzťah medzi tromi parametrami. Spravidla má tvar:

$$F(p, \rho, T) = 0, \quad p = p(V, S), \quad p = p(\rho, T). \quad (3)$$

Zákon zachovania energie:

$$Q_w = E_D - E_w + \frac{p_D + p_w}{2} \cdot \left( \frac{1}{\rho_D} - \frac{1}{\rho_w} \right). \quad (4)$$

Na uzatvorenie sústavy sa aplikuje hypotéza  $\Phi_1(p_D, \rho_D, u_D, t) = 0$ .

Na výpočet okrajových hodnôt sa aplikuje uzatvorená sústava šiestich rovníc (5):

$$\begin{aligned} u_D &= \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_D} \right) \cdot D \\ p_D - p_w &= \rho_w \cdot u_D \cdot D \\ Q_w &= E_D - E_w + \frac{p_D + p_w}{2} \cdot \left( \frac{1}{\rho_D} - \frac{1}{\rho_w} \right) \\ \frac{p_D}{\rho_D \cdot R \cdot T_D} &= \varphi(\rho_D) \end{aligned} \quad (5)$$

$$E_D = c_v \cdot T_D - \int_{p_D}^{\rho_D} \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_Q - p \right] \cdot \frac{d\rho}{\rho^2}$$

$$\Phi_1(p_D, \rho_D, u_D, t) = 0$$

Vzťahy boli odvodené pre čelo detonačnej vlny, ktorá je rázovou vlnou. Majú teda všeobecnú platnosť pre rázovú vlnu v ľubovoľnom prostredí, ak prostredie

neuvoľňuje energiu, zjednoduší sa zodpovedajúcim spôsobom tretia rovnica sústavy (5) ( $Q_w = 0$ ).

Z prvých dvoch rovníc sústavy (5) plynie po príslušnej zmene v označení rýchlosti častíc na čele rázovej vlny v uvažovanom prostredí:

$$u_\phi = u_x = \sqrt{[(p_x - p_0) \cdot (V_0 - V_x)]}, \quad (6)$$

kde  $p_0, V_0$  - tlak a merný objem prostredia pred čelom rázovej vlny,

$p_x, V_x$  - tlak a merný objem prostredia za rázovým čelom.

Rovnicami (5) a (6) a stavovou rovnicou ľubovoľného prostredia je úloha o počiatkových parametroch rázovej vlny riešená:

$$u_x = \frac{D}{k+1} \cdot \left\{ 1 + \frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_x}{p_D} \right)^{\frac{k-1}{2 \cdot k}} \right] \right\}. \quad (7)$$

Pre rozlet produktov detonácie do prázdnoty  $p_x = 0$  a

$$u_x = u_{\max} = \frac{3 \cdot k - 1}{2 \cdot k - 1} \cdot D. \quad (8)$$

Zo vzťahu (8) plynie  $u_x \leq D$ , čo nezodpovedá realite, lebo rýchlosť  $u_x$  prevyšuje  $D$  takmer dvakrát. Rýchlosť rozletov produktov detonácie do vzduchu prevyšuje hodnotu  $D$ . Nesúlad je spôsobený tým, že pri prudkom spáde tlaku (do  $p_x < 3000$  MPa) sa nedá uvažovať hodnota  $k$  za konštantnú a rovnú trom. Odvodené vzorce dávajú správne výsledky pri výbušných a hustejších prostrediach, kde  $p_x > 3000$  MPa (voda, zeminy atď.).

Podľa [7] možno vyjadriť a vypočítať:

$$u_x = \frac{D}{k+1} \cdot \left[ 1 - \sqrt{2 \cdot k} \cdot \frac{\pi^* - 1}{\sqrt{(k+1) \cdot \pi^* + (k-1)}} \right]. \quad (9)$$

Pre čelo rázovej vlny šíriace sa obklopujúcim prostredím platí rovnica (11), ktorá spolu s (9) a stavovou rovnicou ľubovoľného prostredia rieši danú úlohu.

Pri náraze detonačnej vlny na absolútne tuhú nedeformovateľnú prekážku je  $u_x = 0$  a z (9) plynie pre maximálny pretlak odrazu:

$$\pi^* = \frac{p_x}{p_D} = \frac{5 \cdot k + 1 + \sqrt{17 \cdot k^2 + 2 \cdot k + 1}}{4 \cdot k}. \quad (10)$$

Kov má spravidla väčšiu hustotu a menšiu stlačiteľnosť než produkty výbuchu v čele detonačnej vlny. Pri náraze detonačnej vlny na kov sa vytvorí odrazená rázová vlna a úloha je preto riešená rovnicami (7), (8) a stavovou rovnicou. Pre kovy, kvapaliny a tuhé telesá treba použiť izentropiu (9). Pre rad kovov je  $k_2 = k_1 = 4$ ,  $A^* = 4,5 \cdot 10^5$  MPa (Fe),  $A^* = 2,35 \cdot 10^5$  MPa (Cu),  $A^* = 2,04 \cdot 10^5$  MPa (dural). V oblasti tlakov  $p > 5000$  MPa platí:

$$p_x = p_\phi = A^* \cdot \left[ \left( \frac{o_\phi}{o_o} \right)^{k_2} - 1 \right]. \quad (11)$$

### 1.1 Pomerný impulz

Produkty výbuchu sa rozletia iba v smeroch kolmých na voľné povrchy. Tlak vo všetkých kontaktných bodoch prekážky je zhodný a rovná sa tlaku produktov okamžitej detonácie  $^*p_W$ . Čas pôsobenia tlaku je v rôznych bodoch prekážky rozdielny a rovná sa času príchodu povrchu rozletu do vzdialenosti uvažovaného bodu od najbližšieho voľného povrchu  $x$ , delené rýchlosťou premiestnenia povrchu rozletu  $N_{XW}$ :

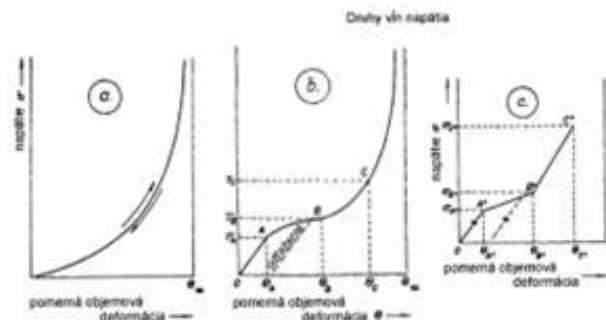
$$\tau = \frac{x}{N_{XW}}. \quad (12)$$

Tlak v čase  $t = 0$  náhle vzrastie, pôsobí po dobu  $\tau$  v rôznych bodoch všeobecne rôznou silou a potom náhle prestane pôsobiť.

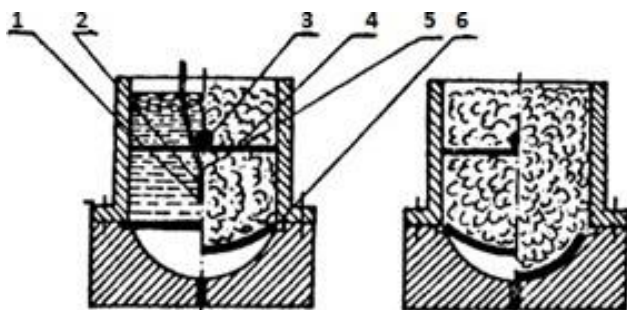
Výbuchové zaťaženie pôsobí na prekážku minimálnu dobu a prejaví sa ako okamžitý impulz:

$$i = ^*p_W \cdot \tau, \text{ inak } i = \int_0^\tau p(t) \cdot dt, \quad (13)$$

kde  $i$  - pomerný alebo merný impulz.



Obr. 2. Závislosť tlakových napätí od pomerných objemových deformácií pre: a) kvapaliny, plyny ap., b) tuhé telesá, c) aproximácia závislosti troma úsečkami v danej oblasti



Obr. 3. Jednoduché ťahanie na 2 operácie explóziou v kvapaline: 1 - I. nálož, 2 - rozbuška, 3 - II. nálož, 4 - priehradka, 5 - zápalnica, 6 - plech

Tvárnenie výbuchom je vhodné pre kusovú alebo malosériovú výrobu rozmerných súčastí. Minimálna medzná hrúbka je 1 mm. Medzný pomer hrúbky k

východiskovému priemeru je pre oceľový plech pri  $t : D = 1 : 300$ . Kritická deformačná rýchlosť, ktorá vytvára maximálnu pomernú deformáciu, býva pri oceli v závislosti od tepelného spracovania od  $29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pri zvyšovaní deformačnej rýchlosti sa mení diagram  $\sigma$ - $\epsilon$ , a to v oblasti nad medzu sklzu, jej hodnota sa zvyšuje až na trojnásobok.

Medzu sklzu pri dynamickom namáhaní možno pre ocele s nízkym obsahom uhlíka ( $\sim 0,05 \%$ ) určiť pri predpoklade konštantnej teploty z upraveného Becker-Ovowanovho empirického vzťahu:

$$\sigma_K = \sigma_{p_t} \cdot \left[ 1 - 0,21 \cdot \left( 2,65 - \log \frac{v}{h} \right) \right]. \quad (14)$$

kde  $\sigma_K$  - medza sklzu,

$v$  - deformačná rýchlosť,

$h$  - výška deformovaného materiálu,

$\sigma_{p_t}$  - medza pevnosti.

Pôsobením veľkých rýchlostí deformácie dochádza ku špeciálnej deformácii materiálovej mriežky natočením, ku vzniku tzv. dvojčiat.

Veľké rýchlosti deformácie umožňujú vznik miestnych drobných plastických deformácií, takže celkový namáhaný prierez nemusí byť ani znateľne deformovaný. Obvykle sa materiál spevní a zvýši sa jeho tvrdosť.

Tvárnenie výbuchom je vysoko rentabilné pre tvarovanie lodných plátov, stien rozmerných nádob, na odstraňovanie ovality nádrží atď. Sú uvádzané tieto pozitívne ekonomické účinky.

Úspory materiálov 50 až 70 % v dôsledku toho, že odpadá obrábanie, úspory času na obrábanie 30 až 85 %, úspora na strojnom parku.

Pri zložitých tvaroch sa využívajú metódy postupného odpaľovania náloží. Postupné odpaľovanie náloží rozdeľuje explozívne tvárnenie na určité postupne realizované operácie, v našom prípade ťahanie polgule.

Vzhľadom na nízke ceny trhavín a jednoduché nástroje (obvykle ide len o formy z dreva, tkaniny alebo betónu) sa dosahuje až 20-násobného zlacnenia výroby oproti zhotovovaniu súčastí klasickým spôsobom.

Energia rázových vln závisí najmä od chemického zloženia výbušnín, množstva a vzdialenosti od polotovaru. Rýchlosti zaťažovania sa pohybujú rádovo okolo  $103 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , tlaky okolo  $104 \text{ MPa}$  a teploty okolo  $103 \text{ K}$ .

Podstatou výpočtu hmotnosti nálože je kritická deformačná práca:

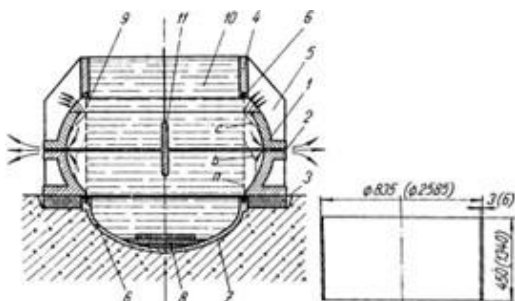
$$A_{krit} = a_{krit} \cdot V \quad (15)$$

a

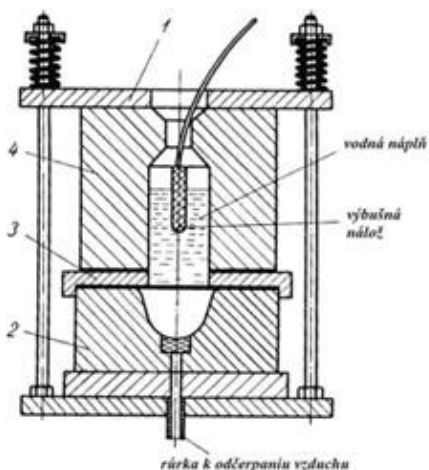
$$a_{krit} = \frac{1}{2} \cdot v_{krit}^2 \cdot \rho \quad (16)$$

kde  $\rho$  - merná hmotnosť,  
 $V$  - objem výtvarku.

Výpočet hmotnosti nálož je podľa toho približný, a preto každú novú technológiu treba vyskúšať.



Obr. 4. Ťažný nástroj pre explozívne ťahanie: 1 - teleso, 2 - plech, 3 - podložka, 4 - vrchná časť, 5 - teleso, 6 - dno, 7 - podstava, 8 - platničky, 9 - polovýrobok, 10 - voda, 11 - nálož, šípky naznačujú smer úniku spalín



Obr. 5. Schéma tvárnenia výbuchom: 1 - univerzálne upínacie zariadenie, 2 - výmenná lisovnica, 3 - gumová podložka, 4 - expanzná komora

## 2 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRE PROCESU

Za normálne (do  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) alebo zvýšené (do  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) rýchlosti tvárnenia sa používajú mechanické alebo hydraulické (lisy) zdroje energie, alebo sa používa energia z expanzie pár a plynov (buchary). V poslednom čase sa intenzívnejšie začala využívať energia z explózií výbušnín (streliviny a trhaviny) a energia z detonácií výbušných zmesí (detonačné horenie pohonných látok). Rýchlosti explozívneho alebo detonačného horenia rozdeľujú tvárnenie na:

1. Tvárnenie s veľmi vysokými rýchlosťami do  $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .
2. Explozívne tvárnenie s rýchlosťami nad  $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Z technologického hľadiska najvyšší rozvoj

zaznamenalo najmä explozívne tvárnenie, ktoré ako zdroj energie využíva:

1. Explozívnu energiu prostredníctvom kontaktnej alebo sprostredkovanej rázovej vlny.
2. Elektrickú energiu prostredníctvom elektrického výboja alebo účinku magnetického poľa.

Explózia nesie v sebe energiu vo forme tlaku, tepla a svetla. Na tvárnenie využívame najmä tlakovú rázovú vlnu, ktorá pôsobí na kov priamo kontaktne (výbušnina je položená priamo na kov) alebo sprostredkovane - nepriamo cez prostredie (výbušnina je uložená nad materiálom) a rázová vlna sa prenáša na kov prostredníctvom rázovej vlny vytvorenej vo vzduchu, vo vode alebo piesku, a len prostredníctvom nej sa potom prenáša na kov, ktorý svojím tlakovým účinkom tvárni do požadovaného tvaru.

## 3 VÝBUCH VO VODNOM PROSTREDÍ

Pri kontaktnom výbuchu, napr. na dne nádrže, sa vytvorí polguľová (sústredená nálož), príp. polparaboloidová (valcová nálož) rázová vlna. Platné sú vzťahy, ktoré boli uvedené v predošlom odseku.

Pre čelo vodnej rázovej vlny platia tieto rovnice:

$$N = (\rho_\phi \cdot u_\phi - \rho_o \cdot u_o) \cdot (\rho_\phi - \rho_o) \quad (17)$$

$$P_\phi = p_o = \rho_o \cdot (N - u_o) \cdot (u_\phi - u_o) \quad (18)$$

kde  $N$  - rýchlosť čela vlny,

$\rho_\phi, u_\phi, P_\phi$  - hustota, hmotová rýchlosť, tlak v čele vlny,

index  $O$  - pred čelom rázovej vlny.

Pri rázových vlnách je  $p_m = p_\phi; \rho_m = \rho_\phi; u_m = u_\phi$ .

$$P_\phi - p_o = d_2 \cdot (\rho_\phi \cdot k_2 - \rho_o \cdot k_2) \quad \text{pre } P_\phi \geq 3000 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$\frac{P_\phi + B}{\rho_\phi \cdot k_2} = \frac{p_o + B}{\rho_o \cdot k_2} \quad \text{pre } P_\phi \leq 3000 \text{ MPa} \quad (20)$$

Priradí sa tiež rovnica pre rýchlosť zvuku:

$$c_{z\phi} = \sqrt{\frac{dp_\phi}{d\rho_\phi}} = \sqrt{\frac{k_2 \cdot (p_\phi + B)}{\rho_\phi}} \quad (21)$$

V rovnici  $d_2 = 40\,250 N_1 - k_2, k_2 = 6,29; B = 30\,450 N = 7,15$ .

Vyjdú rovnice pre štyri veličiny  $N, c_{z\phi}, \rho_\phi, u_\phi$ , ktoré je možné vyjadriť v závislosti od  $p_\phi$  alebo  $\Delta p_\phi$ .

V rozmedzí tlaku 100 až 120 MPa sa dá voda uvažovať ako lineárne pružné prostredie.

Nakoniec podľa *J. Henrycha* (1973) bude:

- rýchlosť čela vlny:

$$N = v_{zo} \cdot \left[ 1 + \frac{(l + k_2) \cdot \rho_\phi}{4 \cdot B \cdot k_2} \right], \quad (22)$$

- rýchlosť zvuku:

$$v_{z\phi} = v_{z0} \cdot \left[ 1 + \frac{(k_2 - 1) \cdot \rho_\phi}{2 \cdot B \cdot k_2} \right], \quad (23)$$

- hmotová rýchlosť:

$$u_\phi = \frac{c_{z0} \cdot P_\phi}{B \cdot k_2}, \quad (24)$$

- teplota:

$$T_\phi \approx T_0. \quad (25)$$

### 3.1 Odras rázovej vlny

Pri dopade rázovej vlny kolmo na absolútne tuhú nepohyblivú prekážku sa náhle zastavia pohybujúce sa častice na čele vlny a pretlak stúpne. Od prekážky sa potom proti prúdu častíc v dopadajúcej vlne šíri odrazená vlna.

Platí vzorec:

$$\Delta p \cdot \Phi_r = \frac{2 \cdot \Delta p_\phi + 2,5 \cdot \Delta p \cdot 2 \cdot \Phi}{\Delta p_\phi + 19000} \text{ [MPa]}. \quad (26)$$

### 3.2 Výpočet množstva trhaviny

Pri uvažovaní toho, že medza sklzu je hranicou medzi pružnou a plastickou oblasťou deformácie, potom pri tvárnení vysokými rýchlosťami musia sa rozlišovať dynamické medze sklzu, a to nestabilnú  $R_{ed}$  a stabilnú  $R_{es}$  [6].

Nestabilná medza sklzu  $R_{ed}$  je špičkové napätie, trvajúce len pri prechode vlny pružnej deformácie a určuje ju vzťah:

$$R_{ed} = \rho \cdot c \cdot v, \quad (27)$$

kde  $c$  je rýchlosť pružnej vlny,

$v$  je rýchlosť častíc,

$\rho$  je hustota tvárneho materiálu.

Po prechode pružnej vlny sa mení proces pri nižšom napätí zo stabilnej dynamickej medze sklzu,  $R_{es}$ , do plastickej oblasti:

$$R_{es} = R_e \cdot \left( \frac{v_d}{v_c} \right)^n, \quad (28)$$

kde  $R_e$  je statická medza sklzu materiálu,

$v_d$  je deformačná rýchlosť pri dynamickom zaťažovaní,

$v_s$  je deformačná rýchlosť pri statickom zaťažovaní,

$n$  je experimentálne určený exponent.

## ZÁVER

Pri hodnotení tvárniacich metód doposiaľ platilo, že sú výhodné pre väčšie série a pri použití dobre tvárných materiálov. Pri tvárnení veľkou energiou táto

skutočnosť stráca buď celú alebo čiastočnú platnosť. Dá sa to dokázať nasledujúcou úvahou:

V celkovej kalkulácii výroby je veľká položka cena nástroja, ktorá pri tvárnení býva nepomerne väčšia než cena nástrojov pre obrábanie. Nutné je teda zaistiť takú veľkosť série, aby podiel ceny nástroja na jeden výlisok bol hospodársky únosný. Toto tvárnenie umožňuje použitie lacných ocelí pre nástroje, nástroje zo železobetónu, umelých hmôt a pod.

Typický je príklad tvárnenia lodnej obšívky. Cena potrebného nástroja vyrobeného z ocele bola stanovená na 3320 až 3985 €. Cena nástroja zo železobetónu, ktorý splnil ten istý účel bola 240 €. Napr. lis, umožňujúci tvárnenie lodného plátu 8 mm hrubého a s rozmermi 3 × 1 m do všestranne zboreného nepravidelného tvaru, sa dá celkom dobre pri tvárnení výbuchom nahradiť 2,5 kg trhaviny v cene 0,35 €. Nedá sa však hovoriť, že by metóda tvárnenia výbuchom bola univerzálna. Tvárnenie veľkou energiou je technológiou doplnkovou a s úspechom sa uplatní tam, kde bežné lisovacie spôsoby sú nedostatočné.

## LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. (2016): *Hydrotvárnienie, Hydroforming*. EDIS Žilina ISBN 978-80-554-1205-4.
- [2] BREPTA, R. - PROKOPEC, M. (1982): *Šírení napěťových vln a rázy v tělesech*. ACADEMIA Praha.
- [4] FARLÍK, A. - ONDRÁČEK, L. (1988): *Teorie dynamického tváření*, SNTL Praha.
- [5] FUCHS, A. (1985): *Steel Research*, 85/6 p. 226.
- [6] HENRYCH, J. (1973): *Dynamika výbuchu a její použití*. Academia Praha.
- [7] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1988): *Plasticity and metal forming*, Cambridge.
- [8] KOLSKY, H. (1987): *Stress Waves in Solids*. Oxford at the Clarendon Press.
- [9] LOVE, A. E. H. (1985): *Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. Cambridge.
- [10] MACHEK, V. a kol. (1983): *Zpracování tenkých plechů*. SNTL Praha.
- [11] MORAVEC, J. (2006): *Odras od hladiny na rozhraní voda- vzduch pri tvárnení explóziou v hydraulickom prostredí*. Hydraulika a pneumatika, roč.VIII.1-2, pp. 63-64, ISSN 1335-5171.