

Explozivne tvárnenie dielcov a jeho podstata

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

Explosive forming of parts and its essence

Abstract: The article focuses on explosive forming of metals, in this case pipes, where the text provides the necessary information about the process of this type of forming. In the second part, based on knowledge from the theory of metal forming, a theoretical analysis of the process is given.

Keywords: pipe, explosive forming, safety, forming technology, loading.

ÚVOD

Explozivne tvárnenie je technológia, ktorá využíva energiu chemickej reakcie výbuchu na formovanie a úpravu kovov. Je to proces, pri ktorom sa využívajú výbuchy na deformáciu materiálu, konkrétne kovových rúrok, do požadovaného tvaru. Tento proces sa často používa na výrobu rúrok, ktoré majú byť schopné odolávať veľmi vysokým tlakom alebo teplotám, ako aj v prípadoch, keď je potrebné vytvoriť materiály s špecifickými mechanickými vlastnosťami [1-3]. Historicky spadajú počiatky tejto technológie do konca 19. storočia, čiže ide o relatívne dlhodobý známy spôsob výroby. Prišlo sa na to, že kovy aj veľmi málo tvárne a pevné sa dajú s úspechom tvárniť (deformovať) pri zaťažovaní veľkou rýchlosťou. Veľké rýchlosti sa technicky najjednoduchšie dosiahnu výbuchom, pri ktorom sa uvoľní veľká energia. V zozname literatúry sú diela, ktoré možno hodnotiť ako klasické. Uvádžeme niektoré z nich, ktoré si dodnes podržali vysoký podiel potrebnej výpovednej hodnoty. Ide o tieto bazálne práce, v ktorých sú uvedené nielen teoretické analýzy, ale aj technologické riešenia a potrebné poznatky o procese explozivneho tvárnenia kovov: Reinhart, F. (1968), Eder, F. X., Wisotzki, H. J. (1967), Smrčka, J., Václavek, M. (1964), Beránek, J. (1964), Pásek, V. a kol. (1964).

1 ZÁKLADY EXPLOZÍVNEHO TVÁRNENIA

- *princíp procesu:* explozivne tvárnenie vychádza z využitia mechanických účinkov výbuchu na deformáciu materiálu. Pri výbuchu sa uvoľní

obrovské množstvo energie, ktorá spôsobí rýchlu expanziu vzduchu, a tým tlakové vlny, ktoré sa šíria v materiáli a deformujú ho. Tento proces umožňuje získať veľmi presné a kvalitné tvarovanie kovov [2, 3].

- *súčasť procesu:* proces explozivneho tvárnenia zahŕňa nasledujúce kroky:
 - *príprava materiálu:* kovové dielce sú pripravené na spracovanie.
 - *umiestňovanie nálož:* na vonkajšiu alebo vnútornú stranu výtvarku sa umiestni výbušnina.
 - *výbuch:* výbušnina sa detonuje, čím vzniká tlaková vlna, ktorá deformuje výrobok do požadovaného tvaru.
 - *ochladzovanie:* po výbuchu sa materiál ochladí a stabilizuje.

2 TECHNOLOGIE VYUŽÍVANÉ V EXPLOZÍVNOU TVÁRNENÍ

Existuje niekoľko variantov explozivneho tvárnenia, ktoré sa využívajú v rôznych odvetviach:

- *explozivne zváranie:* aplikuje sa pri zváraní kovových materiálov, kde sa rúrky alebo plechy spájajú výbuchom, čo umožňuje vytváranie pevných a odolných spojov,
- *explozivne formovanie:* pri takomto type sa používajú výbuchy na formovanie rúrok do špecifických tvarov. Tento proces je obzvlášť užitočný v prípadoch, keď je potrebné vytvoriť veľmi tenké alebo extrémne silné materiály,

- *explozívna konsolidácia*: proces sa používa na zlepšenie hustoty materiálov, kde sa rúrky komprimujú za pomoci explózie do požadovaného tvaru bez potreby použitia dodatočných nástrojov.

3 VÝHODY EXPLOZÍVNEHO TVÁRNENIA

- *vyššia pevnosť a odolnosť*: explozívne tvárnenie umožňuje dosiahnuť materiály s veľmi vysokou pevnosťou, odolnosťou proti nárazom a vyššími mechanickými vlastnosťami,
- *zníženie nákladov na výrobu*: proces môže znížiť náklady na výrobu niektorých produktov, ktoré by boli inak veľmi nákladné, ak by sa vyrábali tradičnými metódami,
- *rýchlosť procesu*: explozívne tvárnenie je rýchle a efektívne, čo je výhodné v prípade, ak je potrebné vyrábať veľké množstvo produktov v krátkom čase,
- *vytváranie tvarov, ktoré sú inak ťažko dosiahnuteľné*: výbuchom sa môžu dosiahnuť veľmi komplikované tvary, ktoré sú nedajú vyrobiť klasickými metódami, ako je trieskové obrábanie.

4 APLIKÁCIE EXPLOZÍVNEHO TVÁRNENIA RÚROK

Explozívne tvárnenie rúrok nachádza uplatnenie v rôznych priemyselných oblastiach [4-7]:

- *ropa a plyn*: rúrky používané v ropných a plynových vrtov sú často vystavené extrémnym podmienkam. Explozívne tvárnenie zabezpečuje, že tieto materiály budú mať potrebnú odolnosť a flexibilitu.
- *letecký priemysel*: rúrky, ktoré sa používajú v leteckých motoroch, musia byť extrémne pevné a odolné. Explozívne tvárnenie poskytuje ideálne riešenie.
- *jadrový priemysel*: v jadrových elektrárňach sa používajú rúrky, ktoré musia odolávať vysokým teplotám a tlakom. Tento proces umožňuje vytváranie rúrok s optimálnymi vlastnosťami pre tieto náročné aplikácie.
- *automobilový priemysel*: v automobiloch, najmä v komponentoch motorov a výfukových systémoch, sa používajú rúrky s vysokou odolnosťou. Explozívne tvárnenie pomáha dosiahnuť požadovanú odolnosť pri zachovaní optimálnej hmotnosti.

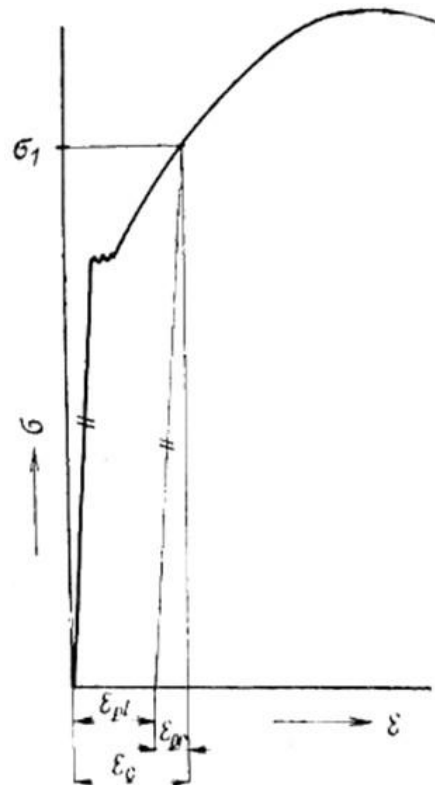
5 VÝHODY A NEVÝHODY EXPLOZÍVNEHO TVÁRNENIA

Aj keď explozívne tvárnenie prináša množstvo výhod, existujú aj určité obmedzenia [5, 6]:

- *vysoké náklady na zariadenie*: počiatočné náklady na zariadenia potrebné pre explozívne tvárnenie môžu byť vysoké, čo môže odrádzať od aplikácie spôsobu tvárnenia.
- *bezpečnosť*: výbušniny a manipulácia s nimi predstavujú riziká, ktoré musia byť dôsledne kontrolované.
- *kontrola kvality*: napriek veľkej efektívnosti procesu sa vyžaduje presná kontrola, aby bola zabezpečená kvalita vyrobených produktov.

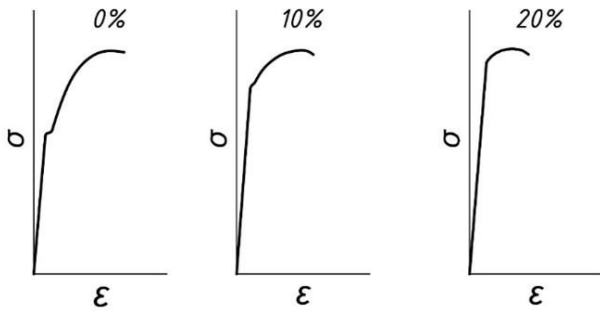
6 POZNATKY O PROCESE VÝBUCHOVÉHO TVÁRNENIA KOVOV

Aplikácia technológie tvárnenia explóziou je spojená s podstatne odlišným spôsobom zaťažovania tvárneného materiálu a nástrojov, než ako je to pri tvárnení na tvárniacich strojoch. Pretože rázové pôsobenie sily na kov môže spôsobiť, že sa pri nesprávnom využití explozívneho spôsobu tvárnenia, čiže nesprávnom a nevhodnom aplikovaní explozívnej sily na kov môže spôsobiť, že sa poruší tvárnený materiál, je potrebné sa zamerať nielen na vypracovanie technológie explozívneho tvárnenia, teda na stanovení veľkosti a rozložení výbušnej nálože. Pri tomto je potrebné zistiť vplyv rázového pôsobenia sily na zmenu mechanických vlastností tvárneného materiálu. (obr. 1). V tomto odseku je pozornosť zameraná na zmenu a charakter pôsobenia rázovej sily na kov [8-10].



Obr. 1. Veľkosť pomernej deformácie pri zaťažení na hodnotu napätia $-\epsilon_{pl}$ pomerná plastická deformácia, celková pomerná deformácia ϵ_c , pružná pomerná deformácia ϵ_{pr}

6.1 Vplyv rýchlosti deformácie na mechanické vlastnosti materiálu



Obr. 2. Spevnenie materiálu po tvárnení za studena

Pri zvyšovaní rýchlosti deformácie sa priebeh diagramu σ - ε mení, a to najmä vo svojej časti nad medzou klzu a hodnota medze klzu sa zvyšuje (obr. 2). Zvyšovanie medze klzu je dôležité z hľadiska tvárnenia, pretože má vplyv na veľkosť potrebnej deformačnej sily. Medza klzu sa dá, ako je známe, stanoviť podľa používaného *Becker-Owovanovho* vzťahu:

$$\sigma_k = \sigma_p \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{2,3 \cdot k \cdot T}{Q}} \cdot \log a - \log \varepsilon' \right]. \quad (1)$$

V rovnici (1) je σ_k medza klzu pri deformačnej rýchlosti $\dot{\varepsilon}$ a σ_p je medza pevnosti pri statickom namáhaní. Hodnota $\sqrt{\frac{2,3 \cdot k \cdot T}{Q}}$ je pre určitý materiál

konštantou (pri predpoklade $t = \text{konšt.}$) a hodnota $\log a$ je druhá konštanta materiálu. Pre ocel s 0,05 % C udávajú *Eder a Wisotzki* [6] túto hodnotu konštant:

$$\sqrt{\frac{2,3 \cdot k \cdot T}{Q}} = 0,21, \quad \log a = 2,65 \quad (2)$$

Medza klzu sa zvyšuje pre rôzne materiály v závislosti od rýchlosti deformácie aj nad medzu pevnosti. Pri predpoklade, že napätie a deformácia materiálu sú rovnomerne rozložené, v tom prípade sa deformačná rýchlosť rovná:

$$\varepsilon' = \frac{u}{h}. \quad (3)$$

V prípade, ak sa deformujúci nástroj pohybuje rýchlosťou u , urazí za krátky čas Δt dráhu:

$$\Delta s = \Delta t \cdot u. \quad (4)$$

Táto dráha je vlastne hodnota stlačenia Δh . Dosadením do vzťahu:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon'}{\Delta t} = \frac{\Delta t \cdot u}{\Delta t \cdot h} = \frac{u}{h}. \quad (5)$$

vyplynie, že rýchlosť deformácie pre takýto prípad sa rovná pomeru rýchlosti u k výške deformovaného materiálu. Z uvedeného sa dá odvodiť, že pri rovnakej rýchlosti nástroja bude deformačná rýchlosť pri odlišne vysokých vzorciach rozličná. Rýchlosť

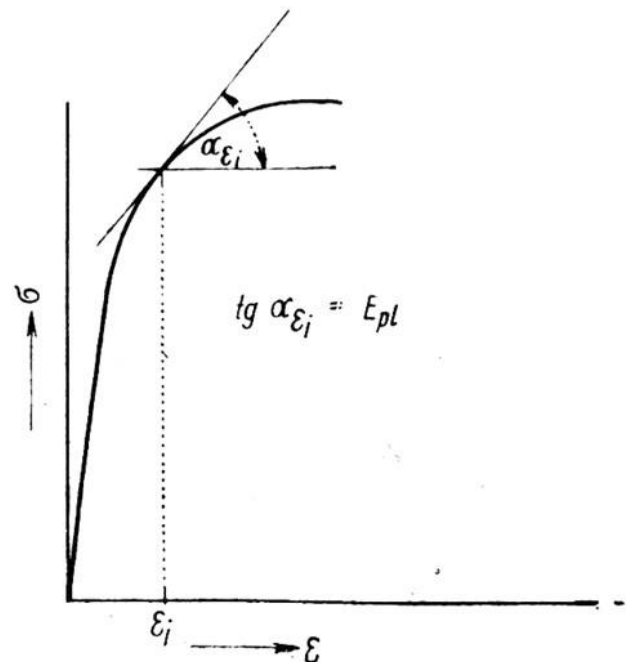
deformácia sa takto mení v širokých medziach len vplyvom výšky deformovaného materiálu, a následkom tohto sa mení medza klzu a deformačný odpor.

6.2 Rýchlosť šírenia plastickej deformácie

Pri prekročení medze klzu sa vytvárajú plastickej deformácie. Tieto deformácie sa šíria v materiáli určitou rýchlosťou, ktorá je však závislá od veľkosti príslušnej deformácie. Uvažuje sa prípad, kedy dlhá tyč je namáhaná ťahom rázom, a to rýchlosťou väčšou, než odpovedá medzi klzu. Podľa *Th. Kármána*, ktorý odvodil vzorce pre šírenie plastickej deformácie, sa vznikajúca plastickej deformácia šíri v materiáli rýchlosťou, ktorá je daná výrazom:

$$D_p \cdot L = \sqrt{\frac{d\sigma}{d\varepsilon}} \cdot \rho. \quad (6)$$

Člen v čitateli zlomku rovnice (6) sa nazýva modul plasticity E_{pl} . Je to vlastne tangens uhla, ktorý zvierá dotyčnica vedená v bode ε_1 ku krivke σ - ε s osou ε . Na obr. 3 je táto dotyčnica naznačená pre veľkosť pomerneho predĺženia.



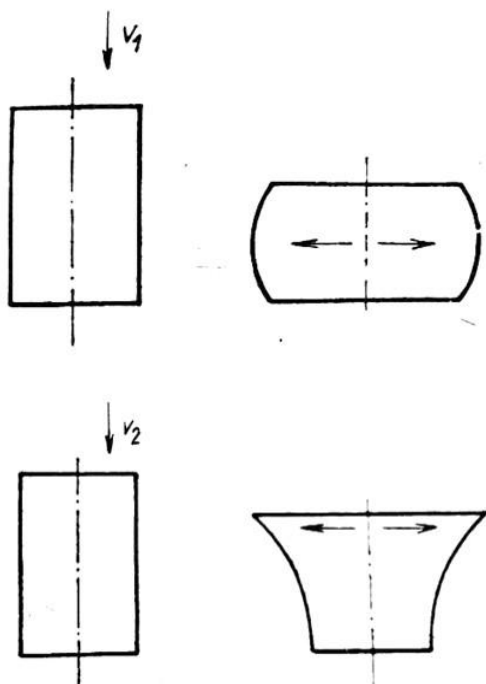
Obr. 3. Znárodnenie modulu plasticity pre hodnotu pomernej deformácie ε_1

Z priebehu krivky σ - ε (obr. 3) je vidno, že modul plasticity pre vyššie hodnoty pomerneho predĺženia sa neustále znižuje. To znamená, že rýchlosti, ktorými sa budú tieto deformácie šíriť budú stále nižšie. Výpočtami aj experimentálne bolo zistené, že pri určitej nárazovej rýchlosti opäť vzniká určitá konštantná deformácia, ktorá však pozvoľna prechádza čelom plastickej vlny do oblasti nedeformovaného materiálu. Veľkosť tejto pomernej deformácie v závislosti od rýchlosti je daná výrazom:

$$u = \int_0^\varepsilon \sqrt{\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot d\varepsilon} \cdot d\varepsilon \quad (7)$$

Pretože však výraz pod odmocninou závisí od všeobecnej krivky σ - ε nedá sa rovnica riešiť výpočtom a je nutné ε_{\max} stanoviť graficky. Hľadané ε_{\max} je horná medza integrálu.

Na obr. 4 sú schematicky naznačené tvary valčekov po klasickej a vysokorýchlostnej deformácii.



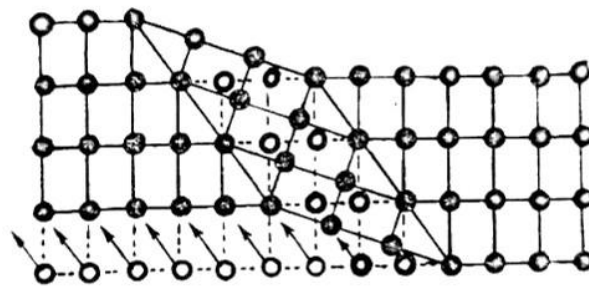
Obr. 4. Tvar valčekov po deformácii pomalou rýchlosťou v_1 (hore) a deformácia vysokou rýchlosťou $v_2 \gg v_1$ (dole)

6.3 Mikroskopické zmeny materiálu pri tvárnení výbuchom

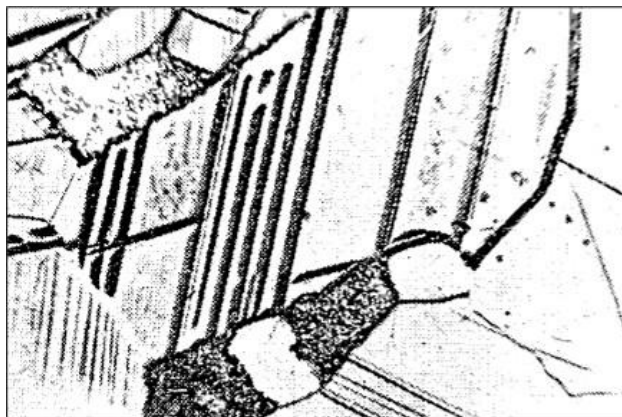
Na obr. 5 až obr. 7 sú zachytené zmeny materiálu po deformácii výbuchom.



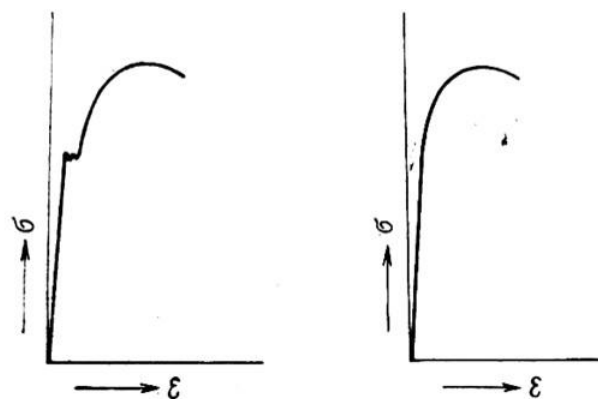
Obr. 5. Vzhľad klzných čiar v mikroštruktúre ocele (zv. 300x)



Obr. 6. Schéma dvojčatenia, kedy sa vrstva atómov natočí a tak umožní deformáciu



Obr. 7 Vzhľad radu dvojčiat v mikroštruktúre bežnej ocele (zv. 1 500x)



Obr. 8. Vplyv pôsobenia silnej rázovej vlny na priebeh diagramu σ - ε : a) oceľ 11 373 v normálnom stave, b) oceľ 11 373 ovplyvnená explóziou

ZÁVER

Explozívne tvárnenie rúrok je inovatívny a efektívny proces, ktorý sa používa na výrobu vysoko odolných materiálov pre rôzne priemyselné aplikácie. Aj keď tento proces vyžaduje vysoké technologické vybavenie a dodržiavanie bezpečnostných opatrení, jeho výhody v podobe vyššej pevnosti, rýchlosti výroby a schopnosti formovať zložité tvary sú nezanedbateľné. S rastúcimi požiadavkami na kvalitné materiály v náročných podmienkach, explozívne tvárnenie bude aj naďalej zohrávať dôležitú úlohu v rozvoji moderných technológií.

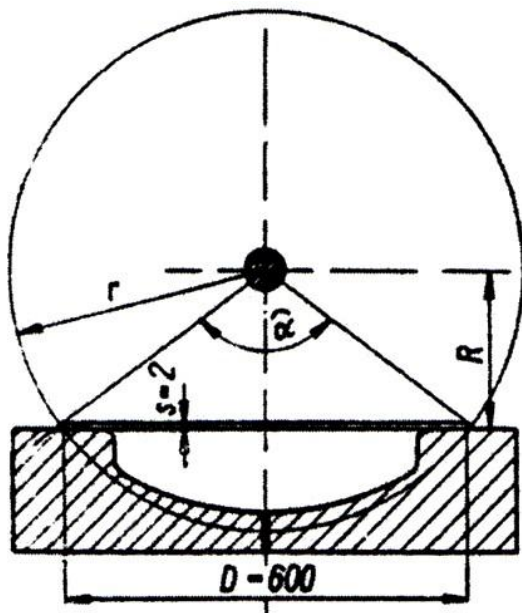
LITERATÚRA

- [1] MORAVEC, J. - BÍLIK, J. (2022): *Technológia tvárnenia v 99 heslách*. EDIS vydavateľstvo UNIZA.
- [2] MORAVEC, J. (2011): *Nekonvenčné metódy tvárnenia*. EDIS vydavateľstvo UNIZA.
- [3] ŽÍDEK, M. - DĚDEK, V. - SOMMER, B. (1988): *Tváření oceli*. SNTL-ALFA, Praha.
- [4] BLAŠČÍK, K. - POLÁK, K. (1985): *Teória tvárnenia*. ALFA- SNTL Bratislava.
- [5] REINHART, F. (1968): *On fractures caused by Explosions and Impacts*. Golden, Colorado.
- [6] EDER, F. X. - WISOTZKI, H. J. (1967): *Der Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf Lage und Ausbildung der Streckgrenze bei Stahl*. Z. Metallkunde heft 48, No. 10.
- [7] SMRČKA, J. - VÁCLAVEK, M. (1964): *Explozivní tváření plechů a trub*. Knižnice strojírenské výroby, SNTL Praha.
- [8] BERÁNEK, J. (1964): *Tváření výbuchem*. Práce Praha.
- [9] PÁSEK, V. a kol. (1964): *Pokrokové způsoby tváření*. SNTL Praha.
- [10] FARLÍK, A. - ONDRÁČEK, E. (1968): *Teorie dynamického tváření*. SNTL Praha.

DODATOK

Výpočet množstva nálože

Na obr. 9 je schéma usporiadania explozívneho tvárnenia pre tvárnenie kotlového dna [1, 2, 4, 7, 8].



Obr. 9. Geometrické údaje pre výpočet nálože pri tvárnení kotlového dna

Pri tejto technologickej operácii dochádza k stratám v prenosovom prostredí (plyn, kvapalina, sypký materiál) a využitie je iba pri určitom uhle α (obr. 9).

Skutočná potrebná hmotnosť výbušniny m_s sa určí z rovnice:

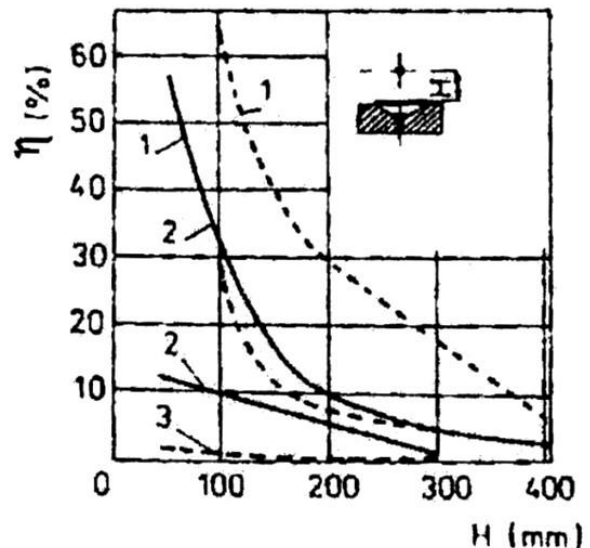
$$m_s = \frac{A_{krit}}{Q \cdot \eta} \quad (8)$$

kde: A_{krit} - merná deformačná energia,

Q - energia trhaviny,

η - účinnosť.

Hodnoty účinnosti η v závislosti od parametrov procesu výbušniny sú na obr. 10.



Obr. 10. Závislosť účinnosti η od vzdialenosti výbušniny H a druhu prenosového média: 1 - voda, 2 - piesok, 3 - vzduch

Uvedené údaje slúžia na doplnenie tejto zložitej problematiky. Matematické vyjadrenie v_{kr} je dané vzťahom:

$$v_{kr} = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \cdot \int_0^{\epsilon_{max}} \sqrt{\frac{d\sigma}{d\epsilon}} \cdot d\epsilon. \quad (9)$$

Pre výpočty v priemyselných aplikáciách bol stanovený nasledujúci vzťah medzi v_{kr} a maximálnou mernou deformačnou prácou a_{kr} :

$$v_{kr} = \sqrt{2 \cdot \frac{a_{kr}}{\rho}}. \quad (10)$$

Pri výpočte nálože sa musia rešpektovať:

- kvalita materiálu v_{kr} [$m \cdot s^{-1}$],
- rozmer materiálu, t. j. plocha S [m^2], objem V [m^3],
- druh výbušniny - trhaviny (výbuchové teplo Q [$kJ \cdot kg^{-1}$]),
- tvar výbušniny (stupeň priestorového využitia α [%]),
- prenosové prostredie (celková účinnosť tvárniaceho procesu η_c [%]),

- celkové geometrické usporiadanie (α [%]).

Má sa určiť A_{kr} , hmotnosti m'' a m' , $v_{kr} = 60,10$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, pre oceľ 12 010.

1. Z rovnice pre $v_{kr} \Rightarrow a_{kr} = \frac{1}{2} \cdot v_{kr}^2 \cdot \rho = 150$ J .
2. Kruhový prístrih $\varnothing D = 600$ mm, $t = 2$ mm má objem $V = \frac{\pi}{4} \cdot 60^2 \cdot 0,2 = 0,000656$ m^3 .
3. Kritické množstvo deformačnej práce je $A_{kr} = a_{kr} \cdot V = 81,3 \cdot 10^2$ J .
4. Priemyslová výbušnina má výbuchové teplo $Q = 2100$ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Hmotnosť nálože zodpovedajúca požiadavke je $m'' = \frac{A_{kr}}{Q} = 3,81 \cdot 10^{-3}$ kg .

5. Nálož m'' je ideálna, neuvažuje so stratami. Pre tento prípad je $\eta_c = 7$ %.

$$\eta_c = \eta_{ch} \cdot \eta_b$$

η_{ch} - chemická účinnosť tvárniaceho procesu,

η_t - technologická účinnosť tvárniaceho procesu,

$$m' = \frac{m''}{\eta_c} = 5,45 \cdot 10^{-2}$$
 kg

Pri tvárnení sa využije iba časť energie z m'' obsiahnutá v priestore α . Pri guľovom tvare nálože sa predpokladá tvar rázovej vlny guľový a tzv. stupeň priestorového využitia a je daný pomerom objemu guľového výseku s vrcholovým uhlom $\hat{\alpha}$ k objemu poglobule s polomerom r . Pre tento prípad je $\alpha = 11^\circ$. Hmotnosť nálože:

$$m = \frac{m'}{\alpha} = \frac{A_{kr}}{Q \cdot \alpha \cdot \eta_c} = 0,496$$
 kg

Hmotnosť nálože m je maximálna hodnota, ktorá teoreticky zaručuje plastický stav materiálu určeného na tvárnenie, uloženého voľne na lisovnici.