

# Rovnanie plechu bodovým ohrevom

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

## Straightening the sheet by spot heating

**Abstract:** The contribution is devoted to the issue of material alignment. The theoretical description and essence of straightening by local heating is presented. Mechanical methods of leveling the material are also covered. In the experimental part, an experiment is described, which is based precisely on the theoretical analysis of the process of straightening by local heating.

**Keywords:** sheet metal, straightening, material, forming, heating

## ÚVOD

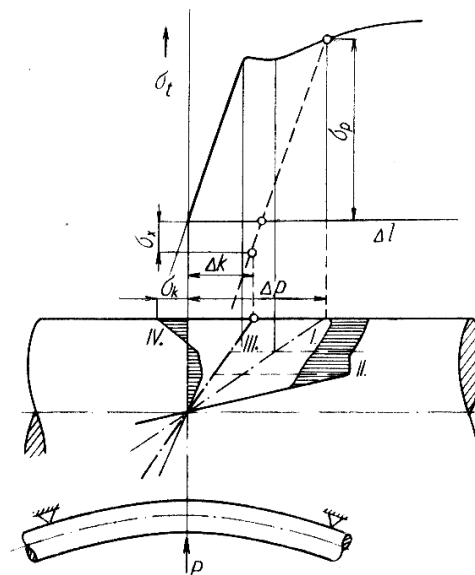
Všeobecne súčiastky a diely vyrobené niektorou z mechanických technológií a ktoré sú zhotovené podľa výrobných dokumentácií, môžu svoju úlohu plniť iba vtedy, ak zabezpečujú všetky potrebné charakteristiky, spravidla prezentované geometrickými danosťami. Svoju úlohu zohrávajú aj vnútorné pnutia v materiáli. Pnutie v materiáli vzniká liatím, tvárnením za tepla i studena, zvarovaním a tepelným spracovaním. Aby sa dali súčiastky napriek vzniknutým deformáciám použiť, musia sa upraviť. Takýmto úpravám sa vzhľadom k prevládajúcim priehybom hovorí rovnanie. Rovnať sa dá mechanicky a tepelne. Náplňou príspevku je rovnanie teplom, tak je potrebné poukázať na to, že pri rovaní teplom dochádza v zásade k použitiu dvoch javov. Predovšetkým je to odstránenie vnútorného pnutia v obmedzenej oblasti dielca, čo má za následok porušenie rovnováhy vnútorných síl a súčiastka alebo konštrukcia sa môžu vyrovnáť. Miestnym ohrevom sa dá dosiahnuť miestna plastická deformácia, čím sa do materiálu vnesú nové vnútorné pnutia, výlučne ťahové, čím sa opäť poruší rovnováha vnútorných síl a diel sa môže vyrovnáť.

## 1 ROVNANIE

### 1.1 Rovnanie mechanické

Ak je pri rovaní hriadeľ podľa obr. 1 prehnutý v smere šípky, je materiál v hornej časti namáhaný ťahom, v dolnej časti tlakom. Veľkosť natiahnutia (stlačenia) je v jednotlivých miestach úmerná ich vzdialenosti od osi hriadeľa. V osi namáhanie nevzniká. Pri väčšom priehybe dosiahne predĺženie horného krajného vlákna hodnotu  $\Delta p$ . Z ťahového

diagramu rovaného materiálu sa dá pre každé predĺženie odčítať napätie vzniknuté počas rovnania.



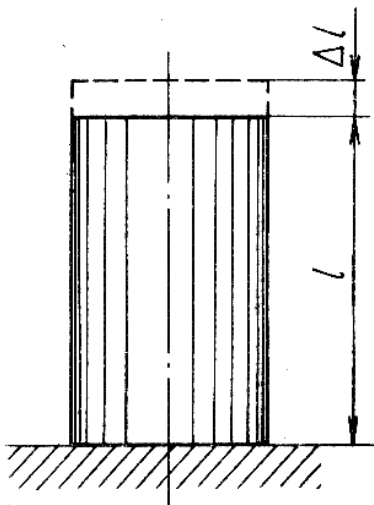
**Obr. 1.** Priebeh napätí v priereze prehnutého hriadeľa: I - priebeh deformácie,  $\Delta l$  po zaťažení tlakom  $P$ ; II - priebeh napätí odvodený z ťahového diagramu; III - deformácia po odľahčení hriadeľa; IV - priebeh napätí v hriadeľi po odľahčení hriadeľa

Predĺženie (skrátene) prebieha od neutrálnej osi podľa priamky I, napätie podľa krivky II odvodené z ťahového diagramu. Ak sa hriadeľ odľahčí, nevráti sa do pôvodného stavu, pretože okrajové časti boli pri prenutí deformované plasticky (na strane ťahových napätí predĺžené a na strane tlakových napätí skrátene). Trvalá deformácia krajných vlákien je teda príčinou prenutia príp. vyrovnania celého hriadeľa. Pôsobením jadra dôjde však po odľahčení ku zmenšeniu priehybu vyvolaného silou  $P$ . Konečný stav predĺženia jednotlivých vlákien je znázornený krivkou III. Jadro a jeho blízke okolie, aj keď nebolo pri rovaní plasticky pretvorené, nemôže

sa vrátiť do svojej pôvodnej polohy. Preto vznikajú v tejto oblasti ťahové (v dolnej časti tlakové) napätia, ktoré prechádzajú pri povrchu do tlakových napätí  $\sigma_K$  (ťahové v dolnej časti). Priebeh pnutí po skončení rovnania je naznačený krivkou IV. Vzhľadom k neutrálnej osi sú tieto pnutia (ich krútiace momenty) v rovnováhe.

## 1.2 Teoretické základy procesu rovnania nekalených súčiastok ohrevom

Rovnanie ohrevom prebieha oproti mechanickému rovnaniu odlišne. Napätia vyvolávajúce plastické deformácie a spôsobujúce narovnanie sa vytvárajú prudkým ohrevom, ktorý väčšinou zasahuje iba povrchové časti prierezu.



Obr. 2. Voľný valec z ocele (predĺženie pri ohreve  $\Delta l$ )

Všetky telesá sa pri ohreve rozťahujú a pri ochladzovaní sa sťahujú. Ocelový valec (obr. 2) s dĺžkou  $l$  a teplotou  $T_1$  položený na pevnom základe rovnomerne na teplotu nižšiu ako  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , predĺži sa o  $\Delta l$ :

$$\Delta l = l \cdot (T_2 - T_1) \cdot \alpha, \quad (1)$$

kde  $T_2$  je teplota ohrevu,

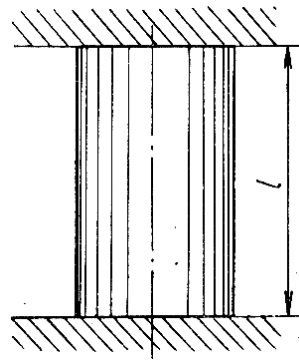
$\alpha$  - koeficient tepelnej rozťažnosti.

V skutočnosti sa ale s teplotou mení. Pre zjednodušenie predpokladáme, že koeficient je konštantný. Pomerné predĺženie valca je:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \alpha \cdot (T_2 - T_1) = \alpha \cdot \Delta T. \quad (2)$$

Jednoduchým postavením valca nevzniknú v ňom napätia; a preto po ochladení na pôvodnú teplotu bude mať pôvodné rozmery.

Ak sa vloží studený valec medzi dve pevné steny (obr. 3) a opäť sa ohreje na teplotu  $T_2$  nebude mať možnosť sa predĺžiť, preto v ňom budú počas ohrevu vznikáť tlakové pnutia. V prípade ak teplota valca neprekročí teplotu  $500\text{ }^\circ\text{C}$  a pnutia budú nižšie ako medza klzu, tieto budú priamo úmerné pomernému predĺženiu  $\varepsilon$ , ktoré by mal voľne postavený valec.

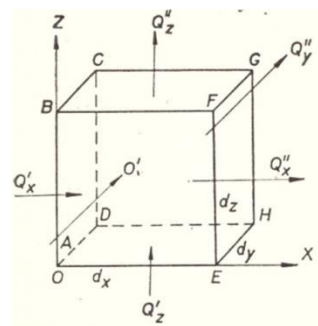


Obr. 3. Zovretý valec z ocele

Pri ohrevu o  $200\text{ }^\circ\text{C}$  vznikajú už také vysoké napätia, že presahujú medzu priťažnosti ocele s nižším obsahom uhlíka, čím dochádza v zovretom valci ku plastickej deformácii tlakom. Valec po vychladení na svoju pôvodnú teplotu má menšiu dĺžku a o niečo väčší priemer. Vnútorne napätia sa však v ňom nenachádzajú.

## 1.3 Základná diferenciálna rovnica tepelnej vodivosti

Rozdelenie tepla v materiáli opisuje základná diferenciálna rovnica tepelnej vodivosti, ktorá sa dá odvodiť zo zákona zachovania energie. Dá sa vybrať zo základného materiálu element tvaru kocky so stranami  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $d_z$  (obr. 4). Fyzikálne parametre skúmaného materiálu sa považujú za konštantné.



Obr. 4. Rozdelenie tepla v elementárnom objeme

Podľa *Fourierovho zákona*, množstvo tepla, ktoré prejde stenou  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  pri teplote steny  $T$  v smere osi  $x$  za čas  $dt$ :

$$Q'_x = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (3)$$

Stenou  $E$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $H$ , ktorej teplota je  $T + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx$  a ktorej argument pre  $x$  je  $x + dx$ , pretečie za tú istú dobu takéto množstvo tepla:

$$Q''_x = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot (x + dx) \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (4)$$

Odstítaním rovnice (2) od rovnice (1) a aplikovaním vety o strednej hodnote diferenciálneho počtu bude:

$$dQ_x = Q'_x - Q''_x = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (4)$$

Zhodné rovnice vyjdú aj v smeroch osi y:

$$dQ_x = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (5)$$

a v smere osi z:

$$dQ_z = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (6)$$

Celkový prírastok tepla v elemente  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ , za čas  $dt$  bude:

$$\begin{aligned} dQ &= dQ_x + dQ_y + dQ_z = \\ &= \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Prírastkom tepla sa zmení teplota elementu za čas  $dt$  o  $\frac{\partial T}{\partial t} \cdot dt$ , a preto sa tepelná energia zvýši o hodnotu:

$$dQ = c \cdot \gamma \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt. \quad (8)$$

Ak sa porovnajú pravé strany rovníc (7) a (8) bude:

$$\begin{aligned} c \cdot \gamma \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt &= \\ &= \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt, \end{aligned} \quad (9)$$

a po úprave napokon:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \cdot \nabla^2 \cdot T. \quad (10)$$

Rovnica (10) je základná rovnica vodivosti tepla. Výraz (11) je koeficient tepelnej vodivosti:

$$\frac{\lambda}{c \cdot \gamma} = a. \quad (11)$$

kde  $c$  je špecifické teplo,

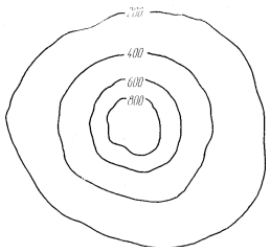
$\gamma$  je merná hmotnosť materiálu,

$\lambda$  je tepelná vodivosť.

Uvedený koeficient charakterizuje rýchlosť vyrovnávania teploty pri meniacej sa tepelnej vodivosti.

## 2 ROVNANIE TECHNOLOGICKÝ POHĽAD BODOVÝ OHREV

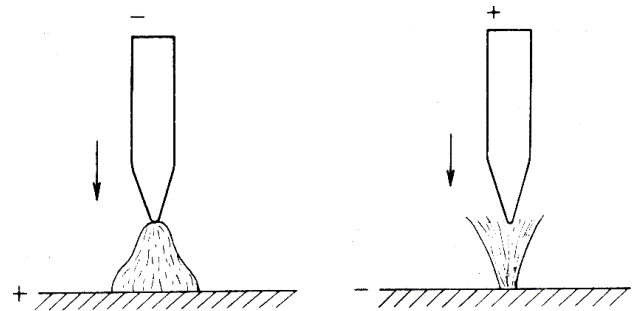
Na obr. 5 je schematicky zobrazený tvar teplotných polí (vrstiev) pri ohreve pomocou bodového ohrevu.



Obr. 5. Rozloženie maximálnych teplôt, ku ktorému dochádza pri bodovom ohreve plechov plameňom

Schéma veľmi vhodne ilustruje spôsob vnášania tepelného zdroja do procesu rovnania lokálnym ohrevom materiálu.

Na obr. 6 je zobrazený správny a nesprávny spôsob zapojenia uhlíkovej elektródy pre ohrev lokálnym spôsobom.



Obr. 6. Vplyv zapojenie uhlíka na tvar oblúka; vľavo- správne horenie oblúka; vpravo- nesprávne horenie oblúka

Technológia rovnania bodovým ohrevom je odlišná od rovnania pásovým ohrevom. Princíp bodového ohrevu spočíva v tom, že pri tomto procese bude ohriaty bod pôsobením odporu studeného okolia (zásobník) podliehať skráteniu. Ubitie ohriateho bodu spôsobí vplyvom tepelnej dilatácie okrem iného aj čiastočné zvýšenie ohriateho bodu. Z tohto dôvodu sa k zvýšeniu účinnosti rovnania ohriate body mechanicky sklepkávajú (týka sa najmä hrubších plechov). Po vychladnutí má ohriaty bod v celom priereze menší objem ako pred ohrevom, čiže do svojho stredu sťahuje celé okolie. Následkom tohto tieto ťahové pnutia vyvolávajú vyrovnanie deformovaného plechu.

## 3 EXPERIMENT

Plech hrúbky 2 mm z ocele STN 11 375 s rozmermi 200 x 450 mm sa nahrieval „koksovou“ bodovým ohrevom súvisle po vyznačených miestach. Tento spôsob spočíva v aplikovaní špicatého segmentu koksu, ktorý je upnutý v zváračských kliešťach. Elektróda sa nakrátko pritlačí k plechu. V miestach dotyku sa vytvoria malé body zahrievané prechodom prúdu s vysokou intenzitou.



Obr. 7. Experimentálne pracovisko



**Obr. 8. Postup vykonania rovnania bodovým ohrevom**

Vplyvom vedenia tepla sa vytvorí súvisle ohriata ploška. Časový interval v rozmedzí približne jedna až jeden a pol sekundy. Elektróda sa potom oddialí a priloží na ďalšie miesto. Koks nemožno máčať, aby nepraskol. Podľa obr. 7 a obr. 8 vidno experimentálne pracovisko a spôsob práce.

Použitie takéhoto spôsobu rovnania je vhodné z dôvodu, že ohrev je rýchly, technicky nenáročný a aplikované prostriedky sú bežne a ľahko dostupné. Na základe uskutočneného experimentu sa dá konštatovať, že použitý spôsob rovnania sa na piatich vzorkách ukázal ako dobrý a vhodný pre prípadné použitie.

## ZÁVER

V príspevku bola pozornosť zameraná na problematiku rovnania deformovaného plechu pomocou bodového ohrevu. Uvedené boli dva pohľady: teoretický a technologický, čiže bol vykonaný experimentálny pokus, ako sa správa plech

pri takomto spôsobe rovnania. Získané výsledky potvrdzujú, že táto oblasť by si zaslúžila hlbšiu pozornosť a záujem, hoci sa vo výrobnej praxi aplikujú tieto spôsoby na vyrovnávanie deformovaných zvarencov. Iste bude len k prospechu, ak táto metóda nájde opäť uplatnenie vo výrobe. V dobe, kedy musíme počítať s obmedzenými zdrojmi a najmä s prihliadnutím na ekologickú stránku procesov je použitie metódy založenej na jednoduchom postupe určite žiaduce.

## LITERATÚRA

- [1] ENGLÁRT, A. - MORAVEC, J. - PILC, J. (2002): *Rovnanie tenkých plechov bodovým ohrevom*. Náradie, ISBN 80-227-1683-9.
- [2] ČERMÁK, J. - DVOŘÁKOVÁ, J. (1980): *Vybrané metody tváření*. ČVUT Praha.
- [3] ELFMARK, J. (1986): *Plasticita kovů*. Ostrava HF VŠB.
- [4] HOSFORD, W. F. - CADDEL, R. M. (2011): *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press, ISBN 978-1-107-00452-8.
- [5] HRIVŇÁK, A. - POLÁK, K. (1989): *Teória tvárnenia a nástroje*. Bratislava.
- [6] JOHNSON, W. - MAMALIS, A. G. (1998): *Plasticity and metal forming*. Cambridge.
- [7] KUMAR, S. (2008): *Technology of Metall Forming Processes*, New Delhi, India, p. 358, ISBN 978-81-208-3425-0.
- [8] VINCZE, K. (1983): *Tvárnění místným ohřevem*. Strojírnoství 33, č. 5 s. 309-311.