

Matematický model deformačných kriviek

Mathematical Model of Deformation Curves

doc. Ing. Rudolf Pernis, CSc.¹; doc. Dr. Ing. Milan Škrobán, CSc.²

¹ Farnet s.r.o, Robotnícka 4334, 017 01 Považská Bystrica, Slovenská republika

² Inoval – Slovenská akadémia vied, Priemyselná 525, 965 01 Žiar nad Hronom, Slovenská republika

Procesy tvárnenia kovov za tepla si vyžadujú znalosť deformačného odporu. Klasická statická skúška ťahom už nepostačuje, pretože nedáva odpoveď na závislosť deformačného odporu od rýchlosti deformácie. Používané torzné plastometre sú v súčasnej dobe nahrádzané kompresnými plastometrami. Zisťovanie deformačného odporu bolo uskutočnené prostredníctvom kaliaceho dilatometra DIL805A/D, ktorý je doplnený o hydraulickú jednotku. Táto umožňuje kompresné skúšky pri vysokoteplotnom tvárnení. Deformačný mód dovoľuje uskutočniť tvárnenie materiálu za definovaných podmienok. Takýmito podmienkami je hodnota deformácie, deformačná teplota a rýchlosť deformácie. Rýchlosť deformácie je možná v rozsahu 0,001 až 20 s⁻¹. Rozsah teplôt je možné nastaviť od izbovej teploty až do 1500 °C. Ako skúšobný materiál bola použitá BCT oceľ. Experimentálne bol zisťovaný deformačný odpor pre skúšobnú maticu 5 deformačných teplôt (800, 900, 1000, 1100, 1200 °C) x 5 rýchlostí deformácie (0,001; 0,01; 0,1; 1; 10 s⁻¹). Pre vyhodnotenie nameraných dát bol navrhnutý matematický model, ktorý popisuje deformačnú krivku v závislosti na deformácii. Ďalej boli navrhnuté rovnice pre výpočet základného deformačného odporu v závislosti dvoch premenných: stupeň deformácie a teplota deformácie, alebo stupeň deformácie a rýchlosť deformácie. Pre tieto dve závislosti sú uvedené vhodné rovnice a ich grafická vizualizácia. Je navrhnutá výpočtová rovnica pre deformačný odpor, ktorý je funkciou troch nezávisle premenných: stupeň deformácie, teplota deformácie a rýchlosť deformácie.

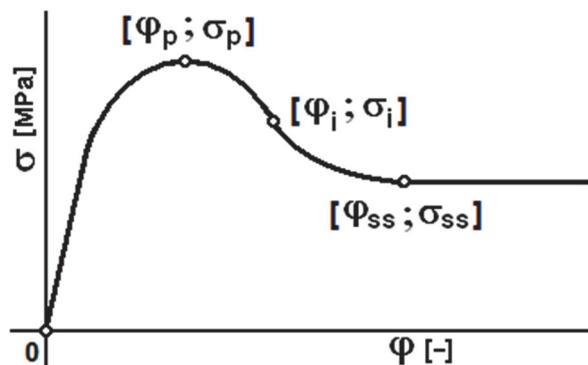
KLúčové slová: bórová oceľ; kompresný test; deformačná krivka; pikové napätie; vysokoteplotná deformácia

Thermoforming processes of metals require knowledge of deformation resistance. A classical static tensile test is no longer sufficient because it does not give dependence of deformation resistance on the deformation rate. The torsion plastometers are currently being replaced by compression plastometers. The deformation resistance was determined using a quenching dilatometer DIL805A / D, which was equipped with a hydraulic unit. This allowed compression tests during high-temperature forming. The deformation mode makes it possible to deform material under defined conditions. Such conditions are strain value, strain temperature and strain rate. It is possible to set a strain rate in the range of 0.001 to 20 s⁻¹. The temperature range can be set from room temperature up to 1500°C. BCT steel was used as the test material. The deformation resistance was experimentally determined for a test matrix of 5 deformation temperatures (800, 900, 1000, 1100, 1200°C) x 5 deformation rates (0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 s⁻¹). To evaluate the measured data, a mathematical model was proposed, which describes the deformation curve depending on the deformation. In addition, the equations were proposed for the calculation of flow stress depending on two variables: deformation and deformation temperature, or deformation and deformation rate. For these two equations, suitable equations and their graphical visualization are given. An equation for the calculation of deformation resistance is proposed, which is a function of three independent variables: deformation, deformation temperature and deformation rate.

Key words: boron steel; compression test; deformation curve; flow stress; high temperature deformation

Pre modelovanie tvárniacich procesov za tepla je potrebné poznať deformačný odpor tvárneného materiálu. Samotné tvárnenie je charakterizované základnými podmienkami tvárnenia, medzi ktoré patrí teplota tvárneného materiálu, veľkosť deformácie, rýchlosť deformácie a deformačný odpor za týchto podmienok. Priebeh deformačného odporu bol zisťovaný prostredníctvom kaliaceho dilatometra DIL805A/D, ktorý je doplnený o hydraulickú jednotkou [1]. Táto umožňuje kompresné skúšky pri vysokoteplotnom tvárnení. Deformačný mód dovoľuje uskutočniť tvárnenie materiálu za definovaných podmienok. Takýmito podmienkami je hodnota deformácie, deformačná teplota a rýchlosť deformácie. Dilatometer umožňuje merať kompresnú silu a tiež merať tejto sile odpovedajúcu zmenu rozmerov skúšobnej vzorky. Zo skutočne name-

ranej sily a skutočne zisteného prierezu vzorky je vypočítané skutočné kompresné napätie (základný deformačný odpor). Táto závislosť umožňuje konštruovať krivky skutočná deformácia – skutočné napätie (true strain – true stress krivky), ktoré nesú označenie ako deformačné krivky [2, 3]. Pre experimentálne zistené deformačné krivky je hľadaný matematický model, ktorý by experimentálne krivky čo najvernejšie popisoval. Priebeh krivky deformačné napätie σ – deformácia φ je uvedený na obr. 1 (True Stress – True Strain diagram). Počiatočná oblasť krivky predstavuje pružnú (elastickú) deformáciu, kde platí Hookov zákon, a túto časť deformačnej krivky tvorí priamka. Odklon krivky od priamky predstavuje pásmo neustáleného plastického toku.



Obr. 1 Charakteristické body na deformačnej krivke
Fig. 1 Characteristic points on the deformation curve

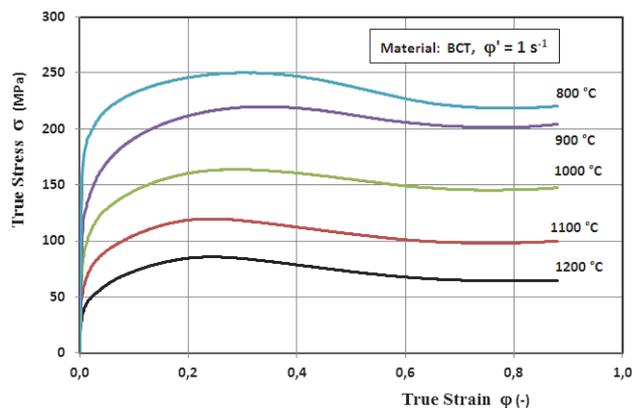
Postupne najprv dochádza k spevňovaniu tvárneho materiálu, až dosiahne krivka maximum a ďalej dochádza k zmäkčovaniu (odpevneniu) [4–6]. Počas kompresnej skúšky za tepla je za definovaných podmienok (geometria vzorky, teplota, rýchlosť deformácie) sledovaný priebeh deformačného napätia v závislosti od deformácie [7, 8]. Na obr. 1 je uvedený typický priebeh tejto krivky. Krivku charakterizuje niekoľko bodov, ktoré sú vyznačené na tejto krivke. Krivka, kde deformačné napätie dosahuje maximálnu hodnotu σ_p má súradnice $[\varphi_p; \sigma_p]$. Často v literatúre je toto napätie označované ako pikové napätie (Peak Stress) σ_p . Toto napätie je považované za deformačný odpor. Deformácia, pri ktorej je dosiahnuté maximálne napätie, je označovaná φ_p . Súradnice $[\varphi_i; \sigma_i]$ charakterizujú inflexný bod krivky. Poslednú oblasť deformačnej krivky predstavuje pásmo ustáleného plastického toku materiálu. V oblasti ustáleného toku nastáva dynamická rovnováha medzi vznikajúcimi a zanikajúcimi dislokáciami. Počiatok ustáleného stavu deformácie charakterizujú súradnice $[\varphi_{ss}; \sigma_{ss}]$, pričom index *ss* má pôvod v anglickom jazyku (steady state) [9, 10].

Popis experimentu

Praktické skúšky merania deformačného odporu boli uskutočnené na zariadení Dilatometer DIL805A/D. Skúšobnú vzorku po geometrickej stránke tvorí valec s priemerom $D = 5$ mm a dĺžkou $L = 10$ mm. Rozsah pracovnej teploty t môže byť zvolený v intervale teplôt 20 až 1500 °C. Pre zisťovanie deformačného odporu bola zvolená teplota 800, 900, 1000, 1100 a 1200 °C. Veľkosť (stupeň) deformácie φ môže byť z intervalu 0,05 až 1,2. Rýchlosť deformácie φ' môže byť z intervalu 0,001 až 20 s⁻¹. Pre zisťovanie deformačného odporu bola zvolená rýchlosť deformácie 0,001; 0,01; 0,1; 1 a 10 s⁻¹. Ako skúšobný materiál bola použitá oceľ s prídavkom bóru, pracovne označená ako BCT. Toto označenie charakterizuje oceľ, ktorá nepatrí medzi normalizované značky ocele. Chemické zloženie ocele je uvedené v tab. 1. Časový priebeh merania deformačného odporu je zaznamenávaný v dátovom súbore samostatne pre každú deformačnú krivku. Namerané dáta sú exportované pre ďalšie spracovanie ako grafické, tak aj numerické. Príklad vizualizácie nameraných dát (kriviek) pre rýchlosť deformácie $\varphi = 1$ s⁻¹ je uvedený na obr. 2.

Tab. 1 Chemické zloženie ocele BCT (hmot. %)
Tab. 1 Chemical composition of BCT steel (wt.%)

Prvok	C	Mn	Si	P	Cr	V	Mo
Obsah	0,12	1,60	0,45	0,013	0,04	0,002	0,02
Prvok	Ni	Nb	Al	S	W	B	Fe
Obsah	0,07	0,04	0,03	0,005	0,01	0,002	zostatok



Obr. 2 Deformačné krivky ocele BCT a $\varphi' = 1$ s⁻¹
Fig. 2 True Strain – True Stress curves for BCT steel and $\varphi' = 1$ s⁻¹

Matematická definícia kriviek

Matematický model – rovnica napätia σ , ktorá by popisovala deformačnú krivku v závislosti od deformácie φ , pri konštantnej rýchlosti deformácie a konštantnej teplote deformácie, by mala vyhovovať nasledovným požiadavkám:

- prechádza počiatkom súradnicového systému,
- má extrém v podobe maxima pre pikové napätie,
- za maximom prechádza inflexným bodom do ustáleného stavu, bez ďalších oscilácií,
- jednoduchý výpočet regresných koeficientov, ktorý nevyžaduje použitie nelineárnej regresie.

Z geometrického pohľadu deformačná krivka uvedená na obr. 1 v počiatkovej časti je určená priamkou, ktorá rastie a prechádza počiatkom súradnicového systému. Krivka v tretej časti klesá a s postupným poklesom tohto útlmu. Takejto požiadavke vyhovuje exponenciálna funkcia s negatívnou hodnotou argumentu. Tieto čiastkové krivky popisujú nasledujúce rovnice

$$\sigma = \varphi \quad (1)$$

$$\sigma = e^{-\varphi} \quad (2)$$

Súčin týchto dvoch rovníc predstavuje základný matematický model deformačnej krivky

$$\sigma = \varphi e^{-\varphi} \quad (3)$$

Táto rovnica neobsahuje žiadne konštanty, ktoré by pomáhali prispôsobiť popisovanie konkrétnych nameraných dát (konkrétnu krivku). Preto rov. (3) ešte vyžaduje doplnenie na nasledovný tvar

$$\sigma = \sigma_0 \varphi^{a_0} e^{F(\varphi)}, \quad (4)$$

kde: σ – deformačný odpor (MPa)

σ_0 – materiálová konštanta (MPa)

φ – logaritmická deformácia (-)

a_0 – konštanta (-)

$F(\varphi)$ – vhodne zvolená funkcia deformácie

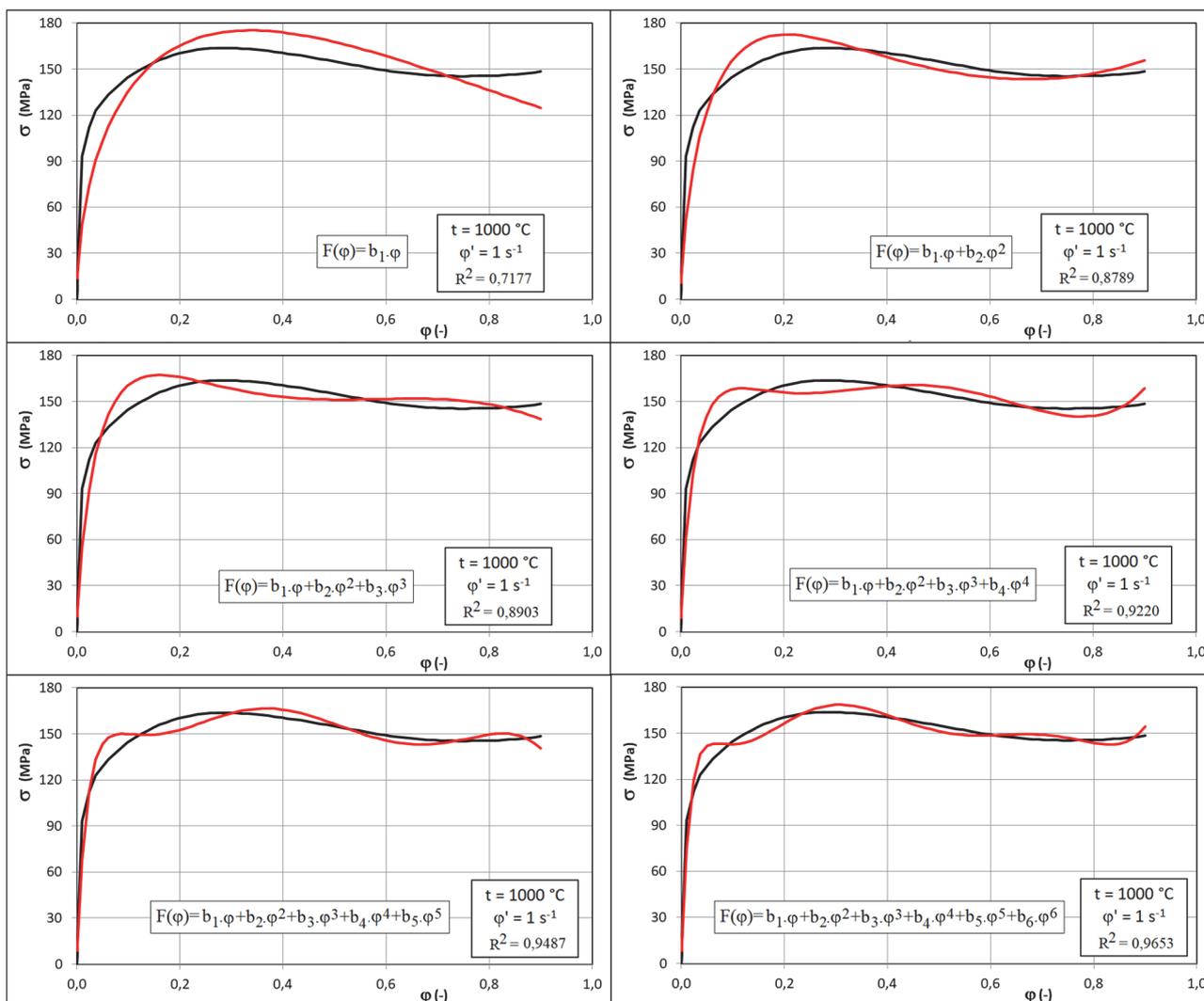
Funkcia $F(\varphi)$ definuje rov. (4) ako otvorený model, ktorý je možné prispôsobiť pre potreby popisu nameraných dát. Prvým nápadom bolo použiť rovnicu priamky

$$F(\varphi) = b_1 \varphi \quad (5)$$

Ak by táto funkcia $F(\varphi)$ nevyhovovala, treba použiť polynóm vyššieho stupňa

$$F(\varphi) = b_1 \varphi + b_2 \varphi^2 + b_3 \varphi^3 + b_4 \varphi^4 + b_5 \varphi^5 + b_6 \varphi^6, \quad (6)$$

kde koeficienty b_1 až b_6 sú bezrozmerné konštanty. Vizualizácia rov. (4) s použitou F -funkcie je uvedená na obr. 3. Čierna krivka zobrazuje namerané dáta a červená krivka predstavuje zobrazenie matematického modelu daného rov. (4). Použitie nižšieho stupňa polynómu rov. (6) dáva nízky koeficient korelácie R^2 . Zvyšovanie stupňa polynómu síce zvyšuje koeficient korelácie, ale červená krivka osciluje okolo čiernej krivky nameraných dát. Bolo odskúšaných množstvo rôznych funkcií, a to napr. $\ln(\varphi)$, $\exp(\varphi)$ a iných. To však nevedlo k uspokojivým výsledkom. Riešenie sa našlo v použití jednoduchých racionálnych funkcií.



Obr. 3 Vplyv stupňa polynómu F -funkcie na aproximáciu deformačnej krivky

Fig. 3 Effect of polynomial function degree of F -function on an approximation of deformation curve

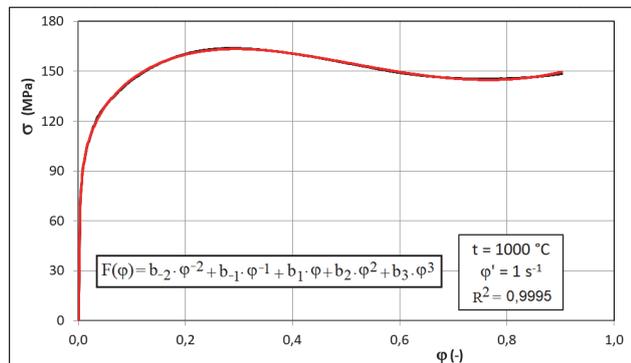
$$F(\varphi) = b_{-2} \varphi^{-2} + b_{-1} \varphi^{-1} + b_1 \varphi + b_2 \varphi^2 + b_3 \varphi^3 \quad (7)$$

V tejto F -funkcii boli použité dva racionálne členy s koeficientami b_{-2} a b_{-1} a tri členy polynómu s koeficientami b_1 , b_2 a b_3 . Výpočet koeficientov deformačnej krivky bol

uskutočnený prostredníctvom všeobecnej lineárnej regrese z linearizovanej rov. (4)

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 + a_0 \ln \varphi + F(\varphi) \quad (8)$$

Pričom za F-funkciu bola dosadená rov. (7). Porovnanie nameranej krivky (čierna farba) s vypočítanou krivkou (červená farba) je uvedené na obr. 4.



Obr. 4 Použitie F-funkcie, rov. (7)
Fig. 4 Use of the F-function, eq. (7)

Tab. 2 Regresné koeficienty červenej krivky na obr. 4
Tab. 2 The regression coefficients of the red curve in Fig. 4

Materiálová konštanta a koeficient	Merná jednotka	Hodnota
σ_0	(MPa)	205,505 485
a_0	(-)	0,160 059
b_{-2}	(-)	-0,000 001 74
b_{-1}	(-)	-0,000 308
b_1	(-)	0,483 604
b_2	(-)	-2,562 027
b_3	(-)	1,836 692

Vypočítané koeficienty pre červenú krivku sú uvedené v tab. 2. Konštanta σ_0 je materiálová konštanta a nepredstavuje hodnotu pikového napätia. Koeficient korelácie R^2 dosiahol hodnotu 0,9995. Táto hodnota signalizuje, že sa nejedná o koreláciu, ale o funkčnú závislosť. Pikovú deformáciu φ_p hľadáme z rovnice

$$a_0 + \varphi \frac{dF(\varphi)}{d\varphi} = 0 \quad (9)$$

Táto rovnica predstavuje prvú deriváciu napätia podľa deformácie, ktorá je rovná nule, čiže $d\sigma/d\varphi = 0$. V prípade F-funkcie rov. (7) jej derivácia je nasledovná

$$\frac{dF(\varphi)}{d\varphi} = -2b_{-2}\varphi^{-3} - b_{-1}\varphi^{-2} + b_1 + 2b_2\varphi + 3b_3\varphi^2 \quad (10)$$

Analytické riešenie rov. (9) je prakticky nemožné. Preto pripadá v úvahu len možnosť riešiť túto rovnicu numerickým spôsobom. Dobré a rýchlo konverguje k požadovanej presnosti Newtonova metóda. Súradnice inflexného bodu sú počítané z druhej derivácie rov. (4), $\frac{d^2\sigma}{d\varphi^2} = 0$. Pre červenú krivku na obr. 4 boli vypočítané súradnice pikového bodu (súradnice maxima krivky) $[\sigma_p; \varphi_p] = [163.35; 0.294]$. Podobne vypočítané súradnice inflexného bodu $[\sigma_i; \varphi_i] = [154.72; 0.508]$.

Vzniká otázka, či je možné jednou rovnicou popísať funkčnú závislosť deformačného odporu v závislosti na deformácii a teplote tvárnenia pri konštantnej hodnote rýchlosti deformácie. Rov. (4) rozšírime o premennú t – teplota deformácie. Konštantu a_0 nahradíme vhodne zvolenou funkciou teploty $E(t)$ a F-funkciu doplníme o teplotu. Rov. (4) potom nadobudne tvar

$$\sigma = \sigma_0 \varphi^{E(t)} e^{F(\varphi,t)} \quad (11)$$

kde: σ – deformačný odpor (MPa)
 σ_0 – materiálová konštanta (MPa)
 φ – logaritická deformácia (-)
 t – teplota deformácie (°C), prípadne $\ln(t)$
 $E(t)$ – vhodne zvolená funkcia teploty deformácie
 $F(\varphi, t)$ – vhodne zvolená funkcia deformácie a teploty

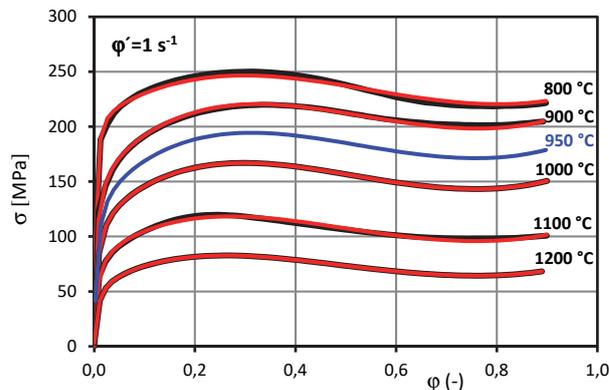
Ako E-funkcia sa osvedčila nasledovná rovnica

$$E(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (12)$$

Konštanty a_0 až a_3 majú rozmer volený tak, aby vykompenzovali rozmer teploty na bezrozmernú hodnotu. F-funkcia je doplnená o premennú t – teplota deformácie

$$F(\varphi, t) = b_1 \varphi^{-3} + b_2 \varphi^{-2} + b_3 \varphi^{-1} + b_4 \varphi + b_5 \varphi^2 + b_6 \varphi^3 + b_7 t + b_8 t^2 + b_9 t^3 + (b_{10} \varphi^{-3} + b_{11} \varphi^{-2} + b_{12} \varphi^{-1} + b_{13} \varphi + b_{14} \varphi^2 + b_{15} \varphi^3) t^{-1} \quad (13)$$

Konštanty b_1 až b_{15} majú rozmer volený tak, aby vykompenzovali rozmer teploty na bezrozmernú hodnotu. Rov. (11) až (13) boli použité na vizualizáciu nameraných a vypočítaných hodnôt ocele BCT pre teploty 800, 900, 1000, 1100 a 1200 °C pri konštantnej rýchlosti deformácie $\varphi' = 1 \text{ s}^{-1}$. Výsledný graf je uvedený na obr. 5.



Obr. 5 Základný deformačný odpor pre teploty 800, 900, 1000, 1100, 1200 °C a predikcia pre 950 °C

Fig. 5 Flow stress for temperatures of 800, 900, 1000, 1100, 1200 °C and prediction for 950 °C

Čierne krivky predstavujú namerané hodnoty deformačného odporu, červené krivky sú vypočítané z matematického modelu, rov. (11). Pre teplotu 950 °C bola stanovená prognóza deformačnej krivky (modrá krivka). Regresné konštanty $\ln \sigma_0$, a_0 až a_3 , b_1 až b_{15} v semilogaritmickej tvare sú uvedené v tab. 3. Pri výpočtoch sa ukázalo, že je vhodnejšie miesto teploty použiť jej logaritmus $\ln(t)$, čo spôsobilo zvýšenie koeficientu korelácie R^2 , ktorý má hodnotu 0,9990. Rov. (11) platí pre podmienky dvoch

premenných deformácia a teplota, pričom rýchlosť deformácie je parametrom. V ďalšom kroku zameníme postavenie teploty a rýchlosti deformácie.

Tab. 3 Regresné koeficienty pre rov. (11)
Tab. 3 Regression coefficients for eq. (11)

Materiálová konštanta a koeficient	Hodnota	Materiálová konštanta a koeficient	Hodnota
$\ln \sigma_0$	-5,129 012E+03	b_6	2,507 898E+01
a_0	-1,994 619E+03	b_7	2,193 670E+03
a_1	8,606 358E+02	b_8	-3,119 962E+02
a_2	-1,237 992E+02	b_9	1,476 942E+01
a_3	5,937 063E+00	b_{10}	-2,591 566E-09
b_1	3,418 775E-10	b_{11}	-1,350 746E-05
b_2	3,016 637E-06	b_{12}	1,733 449E-02
b_3	-5,500 475E-03	b_{13}	5,757 986E+01
b_4	-6,706 657E+00	b_{14}	1,485 438E+02
b_5	-2,596 444E+01	b_{15}	-1,530 371E+02

Deformačný odpor bude funkciou deformácie a rýchlosti deformácie, pričom teplota bude parametrom. V tomto zmysle uskutočnená modifikácia rov. (11) nadobudne podobu

$$\sigma = \sigma_0 \varphi^{E(\varphi')} e^{F(\varphi, \varphi')}, \quad (14)$$

kde: σ – deformačný odpor (MPa)
 σ_0 – materiálová konštanta (MPa)
 φ – logaritická deformácia (-)
 φ' – rýchlosť deformácie (s^{-1})
 $E(\varphi')$ – vhodne zvolená funkcia rýchlosti deformácie

$F(\varphi, \varphi')$ – vhodne zvolená funkcia deformácie a rýchlosti deformácie

Ako E-funkcia sa osvedčila nasledovná rovnica

$$E(\varphi') = a_0 + a_1 \varphi' + a_2 \varphi'^2 + a_3 \varphi'^3 \quad (15)$$

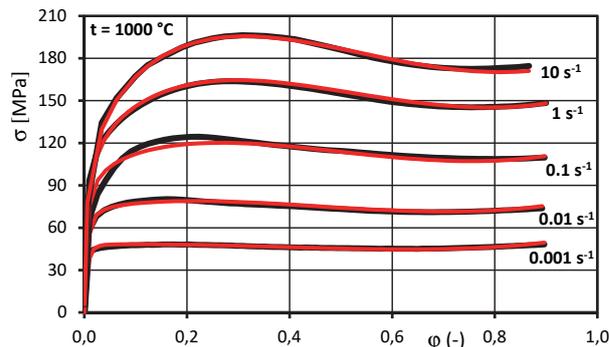
Konštanty a_0 až a_3 majú rozmer zvolený tak, aby vykompenzovali rozmer rýchlosti deformácie na bezrozmernú hodnotu. F-funkcia je doplnená o premennú t – teplota deformácie

$$F(\varphi, \varphi') = b_1 \varphi^{-2} + b_2 \varphi^{-1} + b_3 \varphi + b_4 \varphi^2 + b_5 \varphi^3 + b_6 \varphi' + b_7 \varphi'^2 + b_8 \varphi'^3 + (b_9 \varphi + b_{10} \varphi' \varphi^2 + b_{11} \varphi^{-1} + b_{12} \varphi^{-2} + b_{13} \varphi^{-3}) \varphi' \quad (16)$$

Konštanty b_1 až b_{13} majú rozmer zvolený tak, aby vykompenzovali rozmer rýchlosti deformácie na bezrozmernú hodnotu.

Rov. (14) až (16) boli použité na vizualizáciu nameraných a vypočítaných hodnôt ocele BCT pre rýchlosti deformácie 0,001; 0,01; 0,1; 1 a 10 s^{-1} pri konštantnej teplote deformácie $t = 1000$ °C. Výsledný graf je uvedený na obr. 6. Čierne krivky predstavujú namerané hodnoty a červené krivky sú vypočítané z rov. (14). Regresné konštanty $\ln \sigma_0$, a_0 až a_3 ,

b_1 až b_{13} v semilogaritmickej tvare sú uvedené v tab. 4. Koeficient korelácie R^2 má hodnotu 0,9988.



Obr. 6 Základný deformačný odpor pre rýchlosti deformácie 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10 s^{-1} a teplotu 1000 °C
 Fig. 6 Flow stress for strain rate 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 s^{-1} and temperature 1000 °C

Tab. 4 Regresné koeficienty pre rov. (14)
 Tab. 4 Regression coefficients for eq. (14)

Materiálová konštanta a koeficient	Hodnota	Materiálová konštanta a koeficient	Hodnota
$\ln \sigma_0$	5,313 059E+00	b_5	1,690 137E+00
a_0	1,472 435E-01	b_6	1,740 650E-01
a_1	3,575 078E-02	b_7	-1,558 536E-02
a_2	-1,535 462E-03	b_8	-6,826 992E-04
a_3	-1,995 963E-04	b_9	2,059 394E-13
b_1	-2,339 988E-07	b_{10}	-1,378 337E-07
b_2	-1,672 499E-03	b_{11}	3,812 692E-04
b_3	4,859 074E-01	b_{12}	-7,913 644E-02
b_4	-2,427 908E+00	b_{13}	2,889 782E-03

Ešte zostáva možnosť posúdiť kompletnú definíciu deformačného odporu v závislosti na troch premenných: stupeň deformácie, teplota deformácie a rýchlosť deformácie. Toho sa dosiahne zjednotením rov. (11) a (14) do jednej rovnice

$$\sigma = \sigma_0 \varphi^{E(\varphi, t, \varphi')} e^{F(\varphi, t, \varphi')}, \quad (17)$$

kde: σ – deformačný odpor (MPa)
 σ_0 – materiálová konštanta (MPa)
 φ – logaritická deformácia (-)
 t – teplota deformácie (°C)
 φ' – rýchlosť deformácie (s^{-1})
 $E(\varphi, t, \varphi')$, $F(\varphi, t, \varphi')$ – vhodne zvolené funkcie deformácie, teploty deformácie a rýchlosti deformácie

Tento model si vyžaduje vstup všetkých 25 nameraných deformačných kriviek. Uskutočniť matematický výklad a zdokumentovanie aplikácie rov. (17) by zabralo veľa priestoru. Preto tu je ukončený výklad matematického modelu deformačných kriviek. Táto téma by mohla byť námetom na samostatný článok.

Diskusia výsledkov

Dlhú dobu pre hodnotenie a popis vysokoteplotnej deformácie sa používala a používa ešte poloempirická Garofalova rovnica [4]. Jej nevýhoda spočíva v tom, že popisuje len závislosť pikového napätia na teplote a rýchlosti deformácie [11, 12]. Premennú, ako je hodnota deformácie, však neobsahuje. Preto boli navrhované rôzne empirické rovnice [13]. V Garofalovej rovnici vystupujú 4 konštanty. V [14] je uvedený jednoduchý výpočet koeficientov Garofalovej rovnice. Tieto konštanty sa začali nahrádzať funkciami v tvare polynómu, pričom premennou je stupeň deformácie. Používajú sa polynómy 5. stupňa [15] alebo 6. stupňa [16, 17], pričom počet regresných koeficientov dosahuje hodnotu 28. V [18] je použitý polynóm až 9. stupňa so 40 regresnými koeficientmi. Pre výpočet koeficientov týchto polynómov je nevyhnutné použiť nelineárnu regresiu, čo bežne neovláda každý pracovník výskumu, alebo vývoja. Preto bola hľadaná empirická funkcia, ktorá by umožnila matematický popis deformačných kriviek. Navrhnutá rov. (4) pre matematický popis deformačnej krivky sa ukázala ako otvorený model, ktorý je možné modifikovať prostredníctvom definovanej F-funkcie.

Za použitia F-funkcie danej rov. (7) bolo možné dosiahnuť vysoké hodnoty koeficientu korelácie, veľmi blízke hodnote 1. To dokazuje aj graf uvedený na obr. 4, ktorý dokladuje, že sa tu nejedná o korelačnú závislosť, ale priam o funkčnú závislosť.

Ďalšia úvaha bola, ako matematický model základného deformačného odporu rozšíriť na dve nezávislé premenné, pričom tretia premenná bude parametrom. Prvou úvahou bolo použiť dve nezávislé premenné deformáciu a teplotu, pričom rýchlosť deformácie bude parametrom. Tejto úvahe vyhovel rov. (11), ktorá obsahuje F-funkciu pre dve premenné: deformácia a teplota, rov. (13). Ďalej bola doplnená o E-funkciu, ktorá obsahuje jednu premennú a to teplotu deformácie, rov. (12). Z regresných konštánt uvedených v tab. 3 bola stanovená predikcia deformačnej krivky pre teplotu 950 °C, na obr. 5 modrá krivka. Táto krivka je úplne geometricky podobná ostatným krivkám. Obsahuje pikový bod a tiež inflexný bod. Druhou úvahou bolo vytvoriť rovnicu pre dve nezávislé premenné: deformácia a rýchlosť deformácie, pričom teplota bude parametrom. Toto spĺňa rov. (14) s príslušnými funkciami, E-funkcia a F-funkcia. Vizualizácia rov. (14) je uvedená na obr. 6 a regresné koeficienty sú uvedené v tab. 4. Nad očakávanie boli dosiahnuté vysoké koeficienty korelácie pri použití rov. (11) a (14). Je potrebné podotknúť, že všetky vypočítané regresné koeficienty platia len pre rozsah uskutočnených meraní: stupeň deformácie 0 až 0,9, teplota deformácie 800 až 1200 °C a rýchlosť deformácie 0,001 až 10 s⁻¹.

Poslednou úvahou bolo navrhnuť matematický model základného deformačného odporu pre tri nezávislé premenné: deformácia, teplota deformácie a rýchlosť deformácie (predpokladá použiť najviac 23 regresných koeficientov). Túto požiadavku spĺňa rov. (17).

Záver

Zavedenie nového matematického modelu deformačných kriviek umožnilo získať základný deformačný odpor pre tri nezávislé premenné, ako sú deformácia, teplota deformácie a rýchlosť deformácie. Presné stanovenie deformačného odporu umožnilo spresniť simulácie tvárniacich procesov numerickými metódami, ako je FEM. Všetky navrhnuté matematické rovnice pre výpočet základného deformačného odporu sú prostredníctvom logaritmovania linearizovateľné, čo umožňuje využiť všeobecnú lineárnu regresiu pre výpočet regresných koeficientov. Táto metóda podstatne zjednodušuje štatistické spracovanie nameraných dát. Pre všetky výpočty a tvorbu grafov poslužil Excel. K naprogramovaniu všeobecnej lineárnej regresie bol využitý Visual Basic, ktorý má zabudovaný Excel. Z pohľadu praktického spracovania dát je potrebné prihliadať na hustotu vzorkovania dát pre jednotlivé deformačné krivky, a to zvlášť pri najvyšších a najnižších rýchlostiach deformácie.

Pod'akovanie

Tento článok mohol vzniknúť vďaka tomu, že prof. Ing. Tibor Kvačkej, CSc. z Technickej univerzity v Košiciach, poskytol dostatočné množstvo vzoriek z ocele BCT pre uskutočnenie kompresných skúšok.

Literatúra

- [1] DILATOMETRY, TA Instruments, Hüllhorst, Germany, 2013.
- [2] MIELNIK, E. M. *Metalworking Science and Engineering*. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [3] PERNIS, R., KASALA, J., BOŘUTA, J. *Kovové materiály – Metallic Materials*, 48 (2010) 1,41–46.
- [4] GAROFALO, P. *Trans. Met. Soc. of AIME*, 227 (1963) April, 351–355.
- [5] DRASTÍK, F., ELFMARK, J. *Plastometry a tváriteľnosť kovů*. Praha: SNTL, 1977, 392 s.
- [6] ECKERT, M., KRBATA, M., BARENYI, I., MAJERIK, J., DUBEC, A., BOKES, M. *Materials*, 13 (2020) 5585, 1–21. doi:10.3390/ma13235585.
- [7] SELLARS, C. M., TEGART, W. J. *International Metallurgical Review*, 17 (1972), 1–24.
- [8] TALBERT, S. H., AVITZUR, B. *Elementary Mechanics of Plastic Flow in Metal Forming*. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [9] SPIGARELLI, S., CABIBBO, N., EVANGELISTA, E., BIDULSKÁ, J. *Journal of Materials Science*, 38 (2003) 1, 81–88.
- [10] KUBINA, T., KLIBER, J., KUNCICKA, L., BERKOVA, M., HORSINKA, J., BORUTA, J. *Metallurgija*, 52 (2013), 325–328.
- [11] BIDULSKÁ, J., POKORNÝ, I., KVAČKAJ, T., BIDULSKÝ, R., ACTIS-GRANDE, M. *High Temperature Materials and Processes*, 28 (2009) 5, 315–321.
- [12] KVAČKAJ, T., KOVÁČOVÁ, A., KOČIŠKO, R. *Acta Physica Polonica A*, 128 (2015) 4, 689–692.
- [13] KVAČKAJ, T., POKORÝ, I., VLADO, M. *Acta Metallurgica Slovaca*, 6 (2000) 3, 242–248.
- [14] PERNIS, R. *Acta Metallurgica Slovaca*, 23 (2017) 4, 319–329. <https://doi.org/10.12776/ams.v23i4.1017>
- [15] KRBAŤA, M., ECKERT, M., KRIŽAN, D., BARÉNYI, I., MIKUŠOVÁ, I. *Metals*, 9 (2019) 10, 1–17, doi:10.3390/met9101125.
- [16] QUAN, G., PAN, J., WANG, X. *Appl. Sci.*, (2016), 6, 66; doi:10.3390/app6030066.

- [17] WEI, G., PENG, X., HADADZADEH, A., MAHMOODKHANI, Y., XIE, W.; YANG, Y., WELLS, M. A. *Mechanics of Materials*, 89 (2015) 241–253.
- [18] QUAN, G., YU, C., LIU, Y., XIA, Y. *The Scientific World Journal*, (2014) 12, <https://doi.org/10.1155/2014/108492>.

Třinecké železárny plánují proinvestovat v roce 2021 1,6 mld. korun

www.trz.cz, Třinec, tisková zpráva 2.2.2021

Před výzvami spojenými se snížením uhlíkové stopy při výrobě železa a oceli stojí v roce 2021 Třinecké železárny. Promítne se to do dalšího rozvoje firmy i do investičních plánů. V roce 2020 investice dosáhly výše 1,4 miliardy korun. Letošní plán investic je sestaven *s ohledem na současnou situaci na trhu, ekonomické výhledy, a také zohledňuje následky pandemie koronaviru.*

Rekonstrukce vysoké pece

Ve druhé polovině srpna začne nejvýznamnější investice letošního roku, která potrvá 70 dnů, rekonstrukce jedné ze dvou vysokých pecí v třinecké huti, vysoké pece č. 6 v celkové výši přesahující 600 milionů korun. Její podstatou je rekonstrukce technologického zařízení, které je v provozu nepřetržitě 22 let a s ohledem na technický stav zařízení vyžaduje rozsáhlou obnovu.

Dojde také k renovaci nístěje pece a dokončí se modernizace posledního ze tří ohřivačů větru, které zajistí energetické úspory. *Snížením spotřeby energie dojde ke snížení emisí CO₂, což je jedním z klíčových cílů rekonstrukce. Instalací nového zařízení pro předehřev spalovacího plynu a vzduchu dojde ke snížení spotřeby topných médií a podstatným energetickým úsporám při výrobě surového železa.*

Modernizace výroby oceli

Třinecké železárny letos také zmodernizují zařízení plynulého odlévání oceli č. 1, kde vymění původní rámy vodičích stolic z roku 1989 a transformují lici proudy na možnost odlévání průměru kontislitku 600 mm. Dva lici proudy s tímto rozměrem už v železárnách fungují od roku 2018. Celkové náklady nepřesáhnou 300 milionů korun.

Průměr 600 mm vyžadují především výrobci součástí pro energetický průmysl nejčastěji pro větrné elektrárny. Strategii TŽ je navyšovat podíl výrobků do ekologických oborů přispívajících ke snížení uhlíkové stopy. Proto bylo rozhodnuto pokračovat v rozšiřování kapacity výroby kontislitků vyšších průměrů. Díky této investici budou Třinecké železárny moci dodávat další materiál pro nové větrné elektrárny, které mohou každoročně ušetřit miliony tun CO₂. Do jednoho takového zařízení dodají TŽ ocel na součástky přibližně v objemu 15 tun. Jde o listová, azimutová a hřídelová ložiska a třecí spojky.

Pokud jediná moderní 2MW větrná elektrárna vyrobí zhruba 4000 MWh/rok, ve srovnání s elektrárnou spalující uhlí se jedná o úsporu ve výši okolo 4000 tun CO₂ za rok. Loni z třinecké huti směřovalo do větrné energetiky přibližně 50 000 tun oceli, což je množství potřebné pro výrobu 3000 větrných elektráren. Díky jejich provozu dochází k roční úspoře o zhruba 12 milionů tun CO₂.

Ekologické investice

V létě TŽ spustí významnou ekologickou investici na zpracování surovin. Jde o odprášení Zařízení pro odběr a zpracování směsi pro výrobu vysokopečního aglomerátu. Nový velkostroj je vybaven systémem odprášení, díky čemuž uniká do ovzduší méně prachu při zpracování surovin pro výrobu surového železa a oceli. Oba projekty hut' financuje společně s prostředky Operačního programu Životní prostředí.

Budoucnost hutnictví a jeho transformace

Hutnictví čelí stejně jako další energeticky náročné obory výzvam spojeným se snížením emisí oxidu uhličitého. Oteplování planety je vnímáno jako závažný problém, na jeho řešení se však musí podílet všichni. Pro výrobu oceli tradičním způsobem to znamená nastartovat zásadní technologické změny, které budou z historického hlediska průlomové.

Firmy ve skupině Moravia Steel – Třinecké železárny budou v letošním roce intenzivně pracovat na aktualizaci strategie výroby oceli s cílem snížení emisí CO₂ v oblasti prvovýroby i energetiky. *Transformace podniku bude velmi náročná, protože se jedná o finančně velmi nákladné projekty a rychlost, s jakou se s ní firmy vypořádají, závisí také na tom, jak efektivní a rychlá bude dotační podpora z Evropské unie.*