

VYUŽITIE PRETVÁRNEJ PRÁCE NA HODNOTENIE TVÁRNITEĽNOSTI DRÔTOV

USING OF WORK OF DEFORMATION TO EVALUATION OF WIRE FORMABILITY

Viktor TITTEL

Autor: Ing. Viktor Tittel, CSc.

Pracovisko: Katedra tvárnenia, Materiálovotechnologická fakulta MtF STU, Trnava

Adresa: Bottova 23, 917 24 Trnava, SR

Tel.: 00421 33 5521007 E-mail: viktor.tittel@stuba.sk

Abstract

V príspevku sú prezentované možnosti posudzovania tvárniteľnosti drôtov pomocou viacerých kritérií. Boli posudzované viaceré kritéria (R_m - medza pevnosti v ťahu, $R_{p0,2}$ - medza sklzu, $\sigma_{k \max}$ - skutočné napätie pri roztrhnutí vzorky, A - ťažnosť, Z - kontrakcia, n - exponent spevnenia, D_{sm} - medzná deformačná schopnosť). Ďalšou možnosťou bolo využitie pretvárnej práce na posudzovanie tvárniteľnosti drôtov. Ako experimentálne materiály boli použité valcované drôty z ocelí o obsahu uhlíka 0,04 a 0,71 % C. Materiály boli podrobené pretvoreniu až do vyčerpania plasticity, pričom bola sledovaná zmena ich hodnôt v závislosti na celkovom pretvorení. Na základe priebehu grafov a indexov korelácie boli posúdené jednotlivé kritéria. Ako najvhodnejšie sa preukázali kritéria R_m - medza pevnosti a n - exponent spevnenia. V snahe nájsť kritérium, ktoré by zahŕňalo pevnostné i plastické vlastnosti sme overili pomer pomerné trvalé pretvorenie k mernej pretvárnej práci $\frac{A_g}{w_M} = T [\text{mm}^3 \cdot \text{J}^{-1}]$. Fyzikálny význam vyjadruje objem kovu, ktorý je možné pretvoriť až do maximálneho napätia prácou jedného Joule. Bol stanovený postup na jeho určenie a spôsob používania.

The paper deals with some aspects of evaluation of the wire formability using different criteria, which are as follows: tensile strength (R_m), lower yield point ($R_{p0,2}$), actual stress at specimen fracture, elongation, reduction, degree of strengthening, limiting ductility. Work of deformation was also used for evaluation of the wire formability. Wire rods from steels with carbon contents of 0,04 and 0,71 % C were used as experimental materials. Materials were plastically deformed until they had lost their plasticity, while the materials properties changes in dependence on the total strain degree were studied. Taking into account the both graph data and correlation indexes the criteria were evaluated. Such criteria as tensile strength (R_m) and degree of strengthening appear to be most useful. In order to have criterion containing both the strength and ductile properties we used the relationship between proportional plastic deformation and specific work of deformation $\frac{A_g}{w_M} = T [\text{mm}^3 \cdot \text{J}^{-1}]$. The physical sense of this relationship expresses the volume of metal, which can be deformed to the maximal stress

according to the metal stress-strain diagram by work of 1 Joule. Procedures on the determination of this criterion were described as well as the methods of its application.

Key words

*drôt ťahaný za studena, medza pevnosti, ťažnosť, tvárniteľnosť, práca merná pretvárna
cold drawn wire, tensile strenght, elongation, formability, specific work of deformation*

Úvod

Hodnota tvárniteľnosti je veľmi dôležitý faktor, od ktorého závisí možnosť výroby drôtu ťahaním, technologický postup a ekonomika výroby. Z toho vyplýva nutnosť skúmania tvárniteľnosti, jej zvyšovania a využívania v drôtovňach. Hodnotenie tvárniteľnosti je v praxi veľmi zložitá a to z dôvodu množstva faktorov, ktoré na ňu vplývajú. Na jej hodnotenie sa využívajú hlavne nepriame metódy. Skúmali sme preto v Drôtovni Hlohovec vhodnosť niektorých známych kritérií a pokúsili sme sa odvodiť vhodnejšie kritérium a metódu, ktoré by reálnejšie vyjadrovalo tvárniteľnosť drôtu a jej vyčerpanie.

Skúšobné materiály

Experimenty boli vykonané s dvoma oceľami, ktoré boli vo forme valcovaného drôtu o priemere 5,5 mm. Chemické zloženie je v tabuľke 1, mechanické vlastnosti v tabuľke 2.

CHEMICKÉ ZLOŽENIE OCEĽÍ

Tabuľka 1

| Označenie materiálu | Chemické zloženie (%) | | | | |
|----------------------------|------------------------------|------|-------|-------|-------|
| | C | Mn | Si | P | S |
| Ø 5,5 11300 | 0,041 | 0,27 | 0,014 | 0,013 | 0,016 |
| Ø 5,5 C72K | 0,710 | 0,51 | 0,210 | 0,018 | 0,012 |

Metodika skúšok

Oba materiály (valcované drôty) boli bežným spôsobom (morenie + fosfátovanie) pripravené k ťahaniu. Potom boli ťahané cca 21 percentnými úbermi až na najmenší možný priemer. Oceľ 11 300 bola ťahaná 21 ťahmi na 0,48 mm. Oceľ C72K bola ťahaná 14 ťahmi na 0,98 mm. Následne boli vykonané ťahové skúšky na všetkých vzorkách odobratých po každom ťahu, pričom boli všetky potrebné hodnoty snímané. Z týchto hodnôt boli získané kritéria a zistená zmena ich závislosti na celkovom pretvorení. Na základe priebehov grafov a indexov korelácie boli posúdené jednotlivé kritéria a urobené závery o vhodnosti ich použitia v drôtarenstve [1].

Kritériá hodnotenia

Na základe literárnych údajov [2] bolo zistených celkovo 22 kritérií, ktorými sa dá nepriamo hodnotiť tvárnosť drôtov. Z nich boli na základe literárnych údajov a po posúdení vhodnosti a možnosti zrealizovania skúšok vytypované tieto kritériá:

A – silové:

R_m – medza pevnosti

$R_{p0,2}$ – medza sklzu

R_k – dohovorené napätie pri roztrhnutí

σ_{kmax} - skutočné napätie pri roztrhnutí

B – geometrické

A – ťažnosť

Z – kontrakcia

n – exponent spevnenia

D_{sm} – medzná deformačná schopnosť

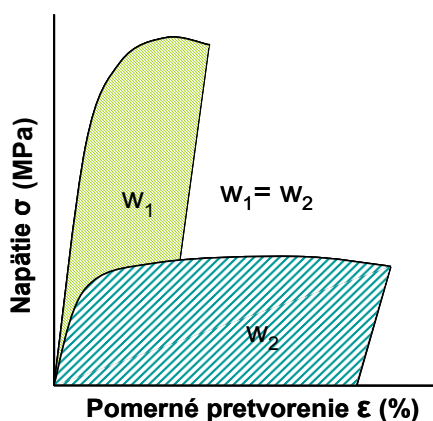
C – kritérium odvodené z pretvárnej práce „T“

Zhodnotenie kritérií a odvodenie kritéria „T“

Silové kritériá – najpoužívanejšie je R_m , ktoré nie je ovplyvnené tvorbou krčku a má spojitý jednoznačný priebeh v závislosti na pretvorení.

Geometrické kritériá – možno doporučiť jediné exponent spevnenia $n = \phi_{krč}$. Kritériá Z a D_{sm} mali veľký rozptyl hodnôt a nejednoznačný priebeh. Ťažnosť nie je vhodná pre veľké rozdiely medzi tvárneným a netvárneným (valcovaným) drôtom. Bližšie sú tieto výsledky v literatúre [1].

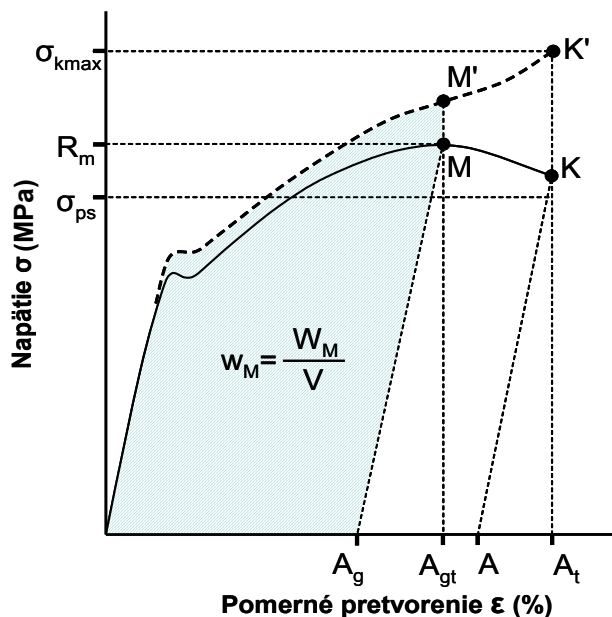
Kritérium odvodené z pretvárnej práce. Použitie pretvárnej práce ako kritéria tvárnosti nie je celkom vhodné pre možnosť rovnakej hodnoty pre rôzne veľkosti limitných pretvorení, ako to ukazuje obr.1 [3, 4].



Kde: w - pomerná pretvárná práca
1, 2 - materiál 1 a 2

Obr. 1 Pomerná pretvárná práca dvoch materiálov s rozdielnou tvárnosťou

Vychádzali sme z pretvárnej práce spotrebovanej po medzu pevnosti R_m pri ťahovej skúške. Po transformácii diagramu $F - \Delta L$ na diagram $\sigma - \varepsilon$ vyšrafovaná plocha obr.č.2.predstavuje túto prácu.



$$w_M = A_g \cdot \sigma_{ps} \quad (1)$$

kde:

$$\sigma_{ps} \cong \frac{1}{A_g} \cdot \int_0^{A_g} \sigma_p \cdot d\varepsilon \quad (2)$$

Po úprave (1) dostaneme:

$$\frac{A_g}{w_M} = \frac{1}{\sigma_{ps}} \quad (3)$$

Obr. 2 Merná pretvárná práca pri ťahovej skúške

Ak označíme obe strany rovnice (3) znakom „T“ dostaneme:

$$T = \frac{A_g}{w_M} [mm^3 \cdot J^{-1}] ; \quad T = \frac{1}{\sigma_{ps}} [mm^2 \cdot N^{-1}] ; \quad \text{resp.} \quad T = \frac{1000}{\sigma_{ps}} [mm^3 \cdot J^{-1}] \quad (4,5,6)$$

Kde: V – objem vzorky
 W_M – pretvárná práca po bod M
 w_M – merná pretvárná práca
 σ_p – pretvárný odpor
 σ_{ps} – stredný pretvárný odpor

Odvođený pomer (4) je možné považovať za kritérium – mieru tvárniteľnosti „T“, čo vyjadruje konkrétny objem, ktorý môžeme 1 Joulom rovnomerne trvale pretvoriť až po medzu pevnosti materiálu. Tvárniteľnosť „T“ je zároveň recipročnou hodnotou stredného pretvárného odporu (5,6). Toto navrhnuté kritérium bolo overené na dvoch skúšobných materiáloch. Namerané a vypočítané hodnoty sú uvedené v tabuľkách 2 a 3.

HODNOTY ZÍSKANÉ Z ŤAHOVEJ SKÚŠKY - OCEĽ 11 300

Tabuľka 2

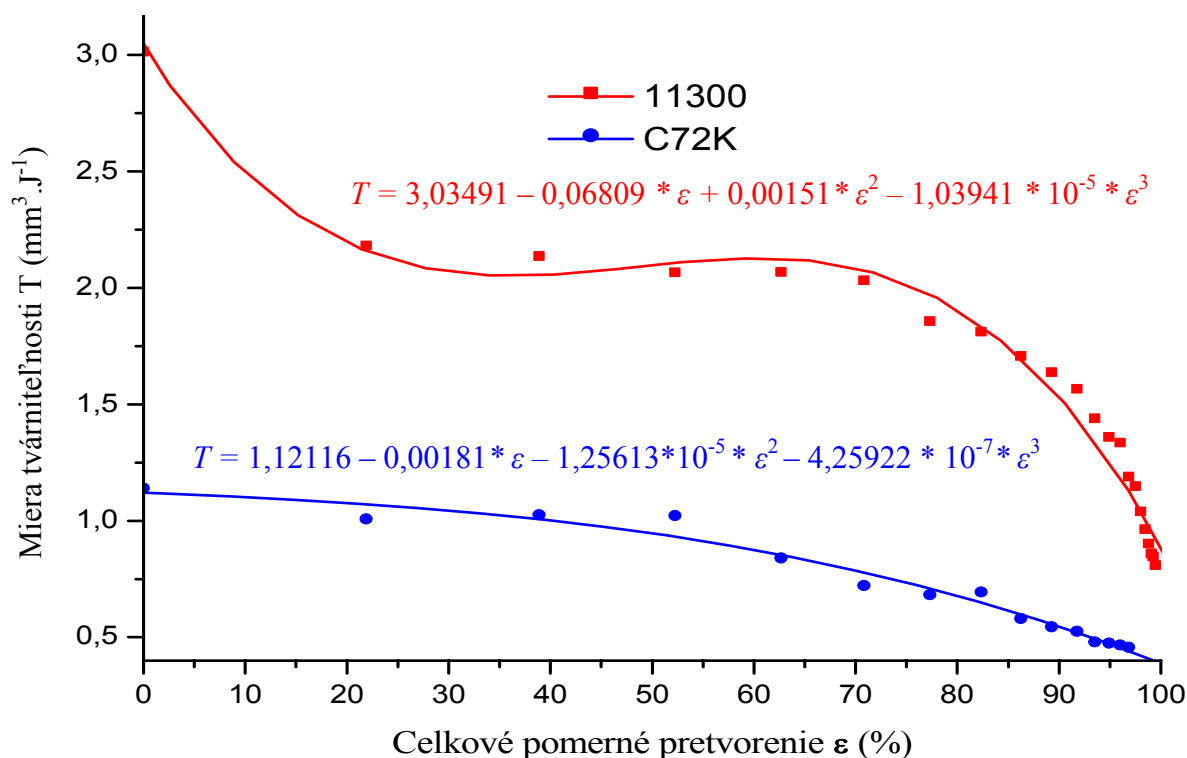
| Por. číslo vzorky | Priemer drôtu d (mm) | Pomerné pretvorenie celkové ε_c (%) | Medza pevnosti R_m (MPa) | Stredný pretvárný odpor σ_{ps} (MPa) | Rovnomerné predĺženie po bod M A_g (%) | Merná pretvárná práca po bod M $w_M = \frac{W_M}{V}$ ($J \cdot mm^{-3}$) | Miera tvárniteľnosti T ($mm^3 \cdot J^{-1}$) |
|-------------------|----------------------------|---|----------------------------------|---|--|--|--|
| 1 | 5,50 | 0,00 | 368 | 332 | 20,93 | 0,06945 | 3,014 |
| 2 | 4,86 | 21,92 | 521 | 458 | 1,89 | 0,00866 | 2,182 |
| 3 | 4,30 | 38,88 | 589 | 468 | 1,85 | 0,00866 | 2,136 |
| 4 | 3,80 | 52,26 | 649 | 484 | 1,79 | 0,00866 | 2,066 |
| 5 | 3,36 | 62,68 | 656 | 484 | 1,72 | 0,00832 | 2,068 |

| | | | | | | | |
|----|------|-------|------|------|------|---------|-------|
| 6 | 2,97 | 70,84 | 674 | 492 | 1,78 | 0,00875 | 2,033 |
| 7 | 2,62 | 77,31 | 692 | 538 | 1,86 | 0,01002 | 1,857 |
| 8 | 2,31 | 82,36 | 721 | 552 | 1,79 | 0,00988 | 1,812 |
| 9 | 2,04 | 86,24 | 737 | 585 | 1,73 | 0,01013 | 1,708 |
| 10 | 1,80 | 89,29 | 751 | 611 | 1,65 | 0,01008 | 1,637 |
| 11 | 1,58 | 91,75 | 791 | 638 | 1,51 | 0,00964 | 1,566 |
| 12 | 1,40 | 93,52 | 844 | 695 | 1,44 | 0,01000 | 1,440 |
| 13 | 1,24 | 94,92 | 894 | 735 | 1,38 | 0,01014 | 1,360 |
| 14 | 1,10 | 96,00 | 937 | 749 | 1,30 | 0,00973 | 1,336 |
| 15 | 0,98 | 96,83 | 955 | 840 | 1,23 | 0,01034 | 1,190 |
| 16 | 0,87 | 97,50 | 992 | 871 | 1,13 | 0,00984 | 1,148 |
| 17 | 0,77 | 98,04 | 1009 | 962 | 1,05 | 0,01010 | 1,040 |
| 18 | 0,68 | 98,47 | 1102 | 1037 | 0,85 | 0,00882 | 0,964 |
| 19 | 0,60 | 98,81 | 1132 | 1109 | 0,83 | 0,00920 | 0,902 |
| 20 | 0,53 | 99,07 | 1133 | 1162 | 0,80 | 0,00930 | 0,860 |
| 21 | 0,47 | 99,27 | 1153 | 1182 | 0,78 | 0,00922 | 0,846 |
| 22 | 0,42 | 99,42 | 1227 | 1236 | 0,73 | 0,00903 | 0,809 |

HODNOTY ZÍSKANÉ Z ŤAHOVEJ SKÚŠKY - OCEĽ C72K

Tabuľka 3

| Por. číslo vzorky | Priemer drôtu D (mm) | Pomerné pretvorenie celkové ϵ_c (%) | Medza pevnosti R_m (MPa) | Stredný pretvárný odpor σ_{ps} (MPa) | Rovnomerné predĺženie po bod M A_g (%) | Merná pretvárná práca po bod M $w_M = \frac{W_M}{V}$ (J.mm ⁻³) | Miera tvárnosti T (mm ³ .J ⁻¹) |
|-------------------|----------------------------|--|----------------------------------|---|--|--|---|
| 1 | 5,50 | 0,00 | 1055 | 877 | 7,55 | 0,06625 | 1,140 |
| 2 | 4,86 | 21,92 | 1267 | 993 | 2,06 | 0,02045 | 1,008 |
| 3 | 4,30 | 38,88 | 1367 | 975 | 2,35 | 0,02291 | 1,026 |
| 4 | 3,80 | 52,26 | 1407 | 978 | 2,43 | 0,02377 | 1,022 |
| 5 | 3,36 | 62,68 | 1502 | 1190 | 2,21 | 0,02630 | 0,840 |
| 6 | 2,97 | 70,84 | 1644 | 1387 | 2,05 | 0,02844 | 0,721 |
| 7 | 2,62 | 77,31 | 1729 | 1463 | 2,00 | 0,02927 | 0,683 |
| 8 | 2,31 | 82,36 | 1778 | 1441 | 1,85 | 0,02665 | 0,694 |
| 9 | 2,04 | 86,24 | 1820 | 1721 | 1,60 | 0,02754 | 0,581 |
| 10 | 1,80 | 89,29 | 1910 | 1839 | 1,56 | 0,02869 | 0,544 |
| 11 | 1,58 | 91,75 | 2004 | 1904 | 1,52 | 0,02895 | 0,525 |
| 12 | 1,40 | 93,52 | 2183 | 2090 | 1,36 | 0,02842 | 0,479 |
| 13 | 1,24 | 94,92 | 2352 | 2105 | 1,21 | 0,02547 | 0,475 |
| 14 | 1,10 | 96,00 | 2557 | 2143 | 0,65 | 0,02036 | 0,467 |
| 15 | 0,98 | 96,83 | 2718 | 2187 | 0,60 | 0,01312 | 0,457 |



Obr. 3 Závislosť $T = f(\varepsilon_c)$

Postup pri stanovovaní „T“ a jeho využívanie

Postup pri stanovovaní „T“ je nasledovný:

- Za dopredu stanovených podmienok ťahania (v - rýchlosť ťahania, 2α - ťažný uhol, druh maziva, ε_c - dielčí úber a pod.) ťahať drôt až do najmenšieho priemeru.
- Po každom ťahu odobrať vzorky drôtu a vykonať ťahové skúšky s cieľom zistiť W_M – spotrebovanú prácu na trvalé pretvorenie po bod M - vid' obr. 1. Trhačka musí mať možnosť vyhodnocovať spotrebovanú prácu. Každú hodnotu stanoviť aritmetickým priemerom z napr. 5 vzoriek.
- Vypočítať w_M - mernú pretvárnú prácu, ako podiel spotrebovanej práce a tvárneného objemu V .
- Urobiť grafickú závislosť $T = f(\varepsilon_c)$, resp. $T = f(\varphi_c)$, kde: ε_c – celkový úber, φ_c – celkové logaritmicke pretvorenie.
- Túto závislosť je možné vyjadriť aj matematicky[5] napr. polynómom tretieho stupňa

Pre konkrétne ocele bol použitý polynóm 3. stupňa:

$$T = A + B1 * \varepsilon + B2 * \varepsilon^2 + B3 * \varepsilon^3 \quad (7)$$

A, B1, B2, B3 – konštanty

Rovnice sú uvedené v obr. 3 a platia pre skúšané ocele v skúšanom rozsahu pretvorenia.

- Alternatívne je možné namiesto $T = f(\varepsilon_c)$, používať $T = f(\varphi_c)$.

Využitie kritéria „T“:

Perspektívne po dopracovaní a dôkladnejšom dlhodobom overovaní, by toto kritérium mohlo byť súčasťou napr. noriem na valcovaný, ale i ťahaný drôt. Pre odberateľov by to bola určitá záruka tváriteľnosti drôtu.

Záver

Experimenty preukázali vhodnosť tejto metódy pre dve ocele. Na skúšky boli použité trhacie stroje Instron s vyhodnocovacou a výpočtovou technikou, ktoré experimenty podstatne urýchlili a skvalitnili. Závislosti $T = f(\epsilon_c)$ boli vyjadrené nielen grafmi, ale i rovnicami. Kritérium „T“ je možné po dopracovaní a dlhobnejšom štatistickom hodnotení navrhnúť ako kritérium na posudzovanie tváriteľnosti valcovaného alebo ťahaného drôtu.

Túto metódu je možné k overeniu odporučiť i v iných technológiách tvárnenia a snažiť sa o jej zovšeobecnenie.

Zoznam bibliografických odkazov:

- [1] TITTEL, V. *Tváriteľnosť drôtov z nekonvenčných ocelí. Kandidátska dizertačná práca.* Trnava: MTF STU, 1992.
- [2] MARCOL, J. *Tažený ocelový drôt.* Bohumín: ŽDB, a.s. Bohumín, 1996.
- [3] VAJO, P. Príspevok ku kritériám hodnotenia tváriteľnosti a možnosti jej maximálneho vyčerpania. In *Zborník z konferencie FORMABILITY 1994.* Ostrava: 1994, s. 559-563.
- [4] HENSEL, A., EXNER, CH. Beitrag über die Einflußgrößen auf das Formänderungsvermögen von Stählen und Erfahrungen mit einer neuartigen Bestimmungsmethode. In *Zborník Tváriteľnosť ocelí za tepla II.* Ostrava: 1974.
- [5] KAPUSTOVÁ, M., BÍLIK, J. Využitie výpočtovej techniky v oblasti tvárnenia. In *Trendy technického vzdelávania 2000.* Olomouc: PF UP, 2000, s. 161-164.