

Kazimierz OSKEDRA  
Zygmunt STEININGER

Katedra Mechaniki  
i Technologii Przeróbki Plastycznej  
Politechniki Śląskiej

LICZBOWE CIĄGI KOLEJNYCH  
ODKSZTAŁCEN W TRAKCIE WIELOSTOPNIOWEGO CIĄGNIENIA DRUTÓW

Streszczenie. W pracy omówiono dotychczasowe poglądy na stosowany w praktyce rozkład kolejnych odkształceń przy ciągnięciu drutów. Opracowano analityczne modele ciągów kolejnych odkształceń i porównano je z praktyką.

1. Wprowadzenie

Zgodnie z doświadczeniami praktyki ciągarskiej liczbowy ciąg kolejnych odkształceń przekroju drutu powinien zabezpieczać minimalną liczbą zabiegów ciągnięcia (przejsć) z zachowaniem spójności odkształcanego metalu oraz zapewniać dokładne wymiary przeciągniętego drutu i jego wymagane własności końcowe.

W latach międzywojennych H. Bühler i H. Buchholz [1] zwrócili uwagę na zmienne w zależności od liczbowego ciągu kolejnych odkształceń końcowe własności drutów ciągniętych. Spostrzeżenie to stało się podstawą rozwoju wielu późniejszych badań, m. in. F. Kohlhasse [2] oraz K.D. Potiemkina [3] i L. Godeckiego [4], co zrodziło wiele poglądów. Z. Steininger [5] poszerza obszar widzenia tej kwestii wyraźnie podkreślając, że oprócz całkowitego odkształcenia przekroju drutu na jego końcowe własności zdecydowanie wpływają kolejne odkształcenia pojedyncze, o których wartości głównie decydują: plastyczność metalu i jego struktura, wartość poprzedzającego odkształcenia, poziom i rodzaj naprężeń własnych, warunki i sposób odkształcania.

Dla ciągnięcia pojedynczego ciąg kolejnych odkształceń drutów dobiera się na ogół według zasady stałych odkształceń jego przekroju lub według odkształceń stopniowo malejących [6].

Przy wielostopniowym ciągnięciu z poślizgiem zasady są podobne, przy czym empirycznie ustalono [6] i [7], że

$$(1) \quad \lg r_n - \lg r_0 = (\lg r_k - \lg r_0) \left( \frac{1+n\beta}{1+n} \right) \cdot \frac{n}{p}$$

gdzie: n - numer przejścia, p - całkowita liczba przejść:  
dla drutów:

- grubych  $\beta = 0,03$

- pozwala uzyskać odkształcenia stopniowo malejące

- średnich  $\beta = 0,02$  | - pozwala uzyskać odkształcenia
- cienkich  $\beta = 0,01$  | stopniowo malejące;
- najcieńszych  $\beta = 0$  - zapewnia odkształcenia stałe,

W praktyce, przy wielostopniowym ciągnięciu bez poślizgu wykorzystywane są stałe, malejące i rosnące - rzadziej zmienne - ciągi kolejnych odkształceń [9].

Celem pracy jest usystematyzowanie zagadnienia przez nadanie ciągom kolejnych odkształceń formuł analitycznych z uwzględnieniem liczby zabiegów ciągnięcia w operacji, liczby kolejnego zabiegu i wartości całkowitego odkształcenia przekroju drutu. Opracowane formuły mogą być wówczas bezpośrednio wykorzystane przez technologów oraz konstruktorów nowoczesnych, sterowanych numerycznie maszyn ciągarskich.

## 2. Teoretyczne modele ciągów kolejnych odkształceń drutów

Przyjęte oznaczenia:

- $m$  - liczba zabiegu ciągnięcia, w którym wystąpi maksymalna wartość pojedynczego odkształcenia  $\delta_m$ ,
- $n$  - liczba kolejnego zabiegu ciągnięcia,
- $p$  - liczba wszystkich zabiegów ciągnięcia w operacji,
- $r_0, r_n, r_k$  - promień drutu, odpowiednio: początkowy; w  $n$ -tym zabiegu; końcowy;

- $\delta_{nc}, \delta_c$  - całkowite rzeczywiste odkształcenie przekroju drutu, odpowiednio: po  $n$ -tym zabiegu ciągnięcia; w całej operacji;
- $\delta_d, \delta_m, \delta_n, \delta_p$  - pojedyncze rzeczywiste odkształcenie przekroju drutu, odpowiednio: minimalne dopuszczalne; maksymalne w  $n$ -tym zabiegu; w  $n$ -tym zabiegu; w ostatnim  $p$ -tym zabiegu.

Dla zadanej liczby  $p$  zabiegów ciągnięcia w operacji i przypisanej jej wartości odkształcenia całkowitego  $\delta_c$  zdamy do określenia następujących ciągów liczb  $\{\delta_n\} = f(n)$ ,  $\{\delta_{nc}\} = f(n)$  oraz dodatkowo  $\left\{\frac{n}{r_0}\right\} = f(n)$ , stanowiących modele rozwiązań.

Dla rozwiązania przedstawionego wyżej zagadnienia wykorzystano definicję pojęcia odkształcenia rzeczywistego, metody rekurencyjne oraz rachunek różnicowy, opierając się na następujących zależnościach

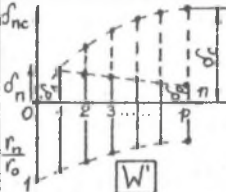
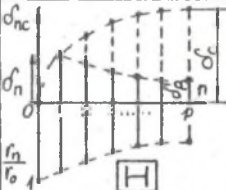
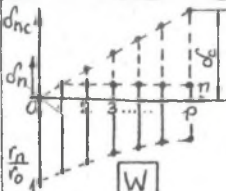
$$(2) \quad \delta_n = 2 \ln \frac{r_{n-1}}{r_n}$$

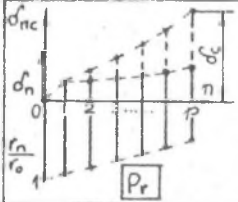
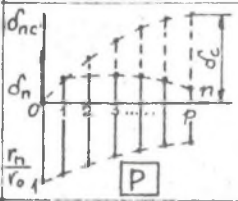
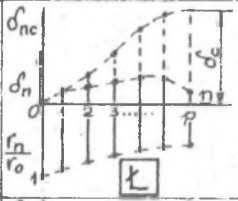
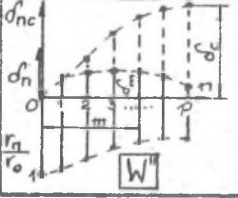
$$(3) \quad \delta_{nc} = 2 \ln \frac{r_0}{r_n}$$

$$(4) \quad \delta_n = \delta_{nc} - \delta_{(n-1)c}$$

$$(5) \quad \delta_{(n-1)c} = 2 \ln \frac{r_0}{r_{n-1}}$$

Modelowe ciągi kolejnych odkształceń w trakcie ciągnięcia drutów

kryt. funkcja $r_n$	Ciągi rzeczywistych odkształceń $d_n$ - pojedynczych; $d_{nc}$ - całkowitych		Podstawowe dane	Związki między $d_n$ i $d_{nc}$
			Warunki dodatkowe	
1. wykładnicza	 <p>Diagram showing diameter <math>d_n</math> vs. step <math>n</math> for exponential deformation. The diameter decreases from <math>d_0</math> to <math>d_n</math> over <math>n</math> steps. The total deformation is <math>d_{nc}</math>. The diagram is labeled <b>W'</b>.</p>	$d_n = \frac{1}{p-1} \left[ 2(p-n) \frac{d_c}{p} - (p-2n+1) d_p \right]$ $d_{nc} = \frac{n}{p-1} \left[ (2p-n-1) \frac{d_c}{p} - (p-n) d_p \right]$ $\frac{r_n}{r_0} = \exp \left\langle -\frac{d_{nc}}{2} \right\rangle$	$p; d_c; d_p$ $d_p < 2 \frac{d_c}{p} - d_d; d_p \gg d_d$ gdzie $p \leq \frac{2 d_c}{d_d + d_d}$ $d_d$ - m.d.s.o.	$d_{nc} - d_n =$ $= \frac{n-1}{p-1} \left[ (2p-n) \frac{d_c}{p} - (p-n+1) d_p \right]$
2. hiperboliczna	 <p>Diagram showing diameter <math>d_n</math> vs. step <math>n</math> for hyperbolic deformation. The diameter decreases from <math>d_0</math> to <math>d_n</math> over <math>n</math> steps. The total deformation is <math>d_{nc}</math>. The diagram is labeled <b>H</b>.</p>	$d_n = 2 \ln \frac{p+n(\exp \frac{d_c}{2} - 1)}{p+(n-1)(\exp \frac{d_c}{2} - 1)}$ $d_{nc} = 2 \ln \frac{p+n(\exp \frac{d_c}{2} - 1)}{p}$ $\frac{r_n}{r_0} = \exp \left\langle -\frac{d_{nc}}{2} \right\rangle$	$p; d_c$ gdzie $d_p \gg d_d$ $d_d$ - m.d.s.o. $p < \frac{\exp \frac{d_c}{2} - 1}{\exp \frac{d_d}{2} - 1} \exp \left( \frac{d_d - d_c}{2} \right)$	$d_{nc} - d_n = 2 \ln \frac{p+(n-1)(\exp \frac{d_c}{2} - 1)}{p}$
3. wykładnicza	 <p>Diagram showing diameter <math>d_n</math> vs. step <math>n</math> for linear deformation. The diameter decreases from <math>d_0</math> to <math>d_n</math> over <math>n</math> steps. The total deformation is <math>d_{nc}</math>. The diagram is labeled <b>W</b>.</p>	$d_n = \frac{d_c}{p} = const.$ $d_{nc} = n d_n = \frac{n}{p} d_c$ $\frac{r_n}{r_0} = \exp \left\langle -\frac{d_{nc}}{2} \right\rangle$	$p; d_c$ $p = \frac{d_c}{d_n}$	$d_{nc} - d_n = \frac{d_c}{p} (n-1)$

4.	<p>liniowa</p> 	$d_n = 2 \ln \frac{p - (n-1)(1 - \exp(-\frac{d_c}{2}))}{p - n(1 - \exp(-\frac{d_c}{2}))}$ $d_{nc} = 2 \ln \frac{p}{p - n(1 - \exp(-\frac{d_c}{2}))}$ $\frac{r_n}{r_0} = \exp(-\frac{d_{nc}}{2})$	$p; d_c$ $d_p > d_d$ gdzie $d_d - m.d.s.o.$ $p \leq \frac{1 - \exp(-\frac{d_c}{2})}{\exp(\frac{d_d}{2}) - 1} \exp \frac{d_d}{2}$	$d_{nc} - d_n = 2 \ln \frac{p}{p - (n-1)(1 - \exp(-\frac{d_c}{2}))}$
5.	<p>paraboliczna</p> 	$d_n = 2 \ln \frac{p^2 - (n-1)(2p-n+1)(1 - \exp(-\frac{d_c}{2}))}{p^2 - n(2p-n)(1 - \exp(-\frac{d_c}{2}))}$ $d_{nc} = 2 \ln \frac{p^2}{p^2 - n(2p-n)(1 - \exp(-\frac{d_c}{2}))}$ $\frac{r_n}{r_0} = \exp(-\frac{d_{nc}}{2})$	$p; d_c$ $d_p > d_d$ gdzie $d_d - m.d.s.o.$ $p \leq \sqrt{\frac{1 - \exp(-\frac{d_c}{2})}{\exp(-\frac{d_c}{2})(\exp(\frac{d_d}{2}) - 1)}}$	$d_{nc} - d_n = 2 \ln \frac{p^2}{p^2 - (n-1)(2p-n+1)(1 - \exp(-\frac{d_c}{2}))}$
6.	<p>kańcuchowa</p> 	$d_n = \ln \frac{p^2 - (n-1)(2p-n+1)(1 - \exp(-d_c))}{p^2 - n(2p-n)(1 - \exp(-d_c))}$ $d_{nc} = \ln \frac{p^2}{p^2 - n(2p-n)(1 - \exp(-d_c))}$ $\frac{r_n}{r_0} = \exp(-\frac{d_{nc}}{2})$	$p; d_c$ $d_p > d_d$ gdzie $d_d - m.d.s.o.$ $p \leq \sqrt{\frac{1 - \exp(-d_c)}{\exp(-d_c)(\exp(d_d) - 1)}}$	$d_{nc} - d_n = \ln \frac{p^2}{p^2 - (n-1)(2p-n+1)(1 - \exp(-d_c))}$
7.	<p>wykładnicza</p> 	$d_n = d_m - \frac{(n-m)^2}{m^2 - (p+1)(m - \frac{2p+1}{6})} (d_m - \frac{d_c}{p})$ $d_{nc} = n \left[ d_m - \frac{m^2 - (n+1)(m - \frac{2n+1}{6})}{m^2 - (p+1)(m - \frac{2p+1}{6})} (d_m - \frac{d_c}{p}) \right]$ $\frac{r_n}{r_0} = \exp(-\frac{d_{nc}}{2})$	$p; d_c; d_m; m - \text{położenie max.}$ $d_m < \frac{(n-1)^2 \frac{d_c}{p} - [m^2 - (p+1)(m - \frac{2p+1}{6})] d_d}{(n-1)^2 - [m^2 - (p+1)(m - \frac{2p+1}{6})]}$ $d_m > \frac{d_c}{p}$ gdzie $d_d - m.d.s.o.$	$d_{nc} - d_n = (n-1) \left[ d_m - \frac{m^2 - n(m - \frac{2n-1}{6})}{m^2 - (p+1)(m - \frac{2p+1}{6})} (d_m - \frac{d_c}{p}) \right]$

$$(6) \delta_o = 2 \ln \frac{r_o}{r_k} = \sum_1^p \delta_n$$

$$(7) \delta_{nc} = \sum_1^n \delta_n$$

$$(8) \frac{r_n}{r_o} = \sqrt{\exp \left\langle - \sum_1^n \delta_n \right\rangle}$$

Wyniki rozważań zestawiono w tabelicy 1, w której oprócz poszukiwanych ciągów kolejnych odkształceń przedstawiono dodatkowo warunki ograniczające rozwiązania, a także podano związki zachodzące między nimi. W tabelicy oznaczono charakterystyczne funkcje przypisane ciągom promieni wywołującym odpowiednie ciągi odkształceń pojedynczych, i tak:

- wykładnicza  $W'$  -  $\{\delta_n\}$  malejący liniowo;
- hiperboliczna  $H$  -  $\{\delta_n\}$  malejący krzywoliniowo;
- wykładnicza  $W$  -  $\{\delta_n\}$  stały;
- liniowa  $Pr$  -  $\{\delta_n\}$  rosnący krzywoliniowo;
- paraboliczna  $P$  -  $\{\delta_n\}$  złożony stało - malejący;
- łańcuchowa  $L$  -  $\{\delta_n\}$  złożony rosnąco - malejący;
- wykładnicza  $W''$  -  $\{\delta_n\}$  złożony z możliwością dobrania maksymalnego odkształcenia pojedynczego.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że charakter zmian ciągów  $\{\delta_n\}$  wyrażonych w odkształceniach rzeczywistych jest identyczny ze zmianami odkształceń pojedynczych wyrażonych względnym ubytkiem przekroju.

### 3. Wykorzystanie modeli teoretycznych w praktyce ciągarskiej

Opracowane modele teoretyczne ciągów kolejnych odkształceń są porównywalne z praktyką ciągarską i stają się pomocne przy opracowaniu technologii pojedynczego i wielostopniowego ciągnięcia drutów zarówno na ciągarkach poślizgowych, jak i bezpoślizgowych.

Odształcanie metali i stopów w określonych warunkach ciągnięcia jest realizowane przykładowo według poniższych modeli:

- $W'$  - ciągnięcie z poślizgiem miedzi, aluminium oraz stali średnio- i wysokowęglowych przy dużych wartościach  $\delta_o$  i  $p$ ; ciągnięcie stali austenitycznych oraz wiązki drutów;
- $H$  - ciągnięcie z poślizgiem aluminium, miedzi, mosiądzów, wysokowęglowych stali sprężonych przy dużych wartościach  $\delta_o$  i  $p$  oraz stali austenitycznych. Ciągnięcie bez poślizgu stali niskowęglowych przy małych  $\delta_o$  i  $p$ ; ciągnięcie wiązki drutów;
- $W$  - ciągnięcie z poślizgiem stali średniowęglowych oraz większości metali i stopów;
- $Pr$  - ciągnięcie z poślizgiem miedzi, a także patentowanych stali średniowęglowych przy dużych  $\delta_o$  i  $p$  z zastosowaniem kilkukrotnych przebiegów  $\{\delta_n\}$ . Ciągnięcie bez poślizgu stali niskowęglowych przy

małych  $\delta_c$  i  $p$ ;

- γ - ciągnięcie stali niskowęglowych przy małych  $\delta_c$  i  $p$ ; ciągnięcia stali austenitycznych i wiązki drutów;
- Ł - ciągnięcie stali sprężynowych (0,9%C) o dużej liczbie skręceń i przegięć, przy dużych  $\delta_c$  i średnich  $p$  ( $p=11-13$ );
- W<sup>n</sup> - ciągnięcie cynku oraz jak w modelu Ł.

#### 4. Wnioski

Przedstawione w pracy rozważania pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- wprowadzenie ciągu promieni drutów do rozważań umożliwiło rozwiązanie problemu analitycznego opisanie ciągów kolejnych odkształceń, których brak odczuwało się w praktyce;
- wykazano, że opracowane modele odpowiadają przebiegom odkształceń stosowanym w praktyce ciągnięcia pojedynczego i wielostopniowego;
- opracowane ciągi ułatwiają projektowanie technologii ciągnięcia;
- za klasyczne należy uważać modele: W, H, W, Pr; a modele P, Ł, W<sup>n</sup> rokują większe zastosowanie w przyszłości dla nowo tworzonych stopów metali.

#### LITERATURA

- [1] Bthler H., Buchholz H.: Archiv das Eisenhüttenwesen. 7, 1934.
- [2] Kohlhasse F.: Die Praxis der modernen, rationellen und wirtschaftlichen Fertigung unlegierter und legierter Stahldrähte. Dortmund 1963.
- [3] Potiemkin K.D.: Tjerniczeskaja obrabotka i wołoczenije vysokoprocnoj prowołoki. Miatzałurgizdat, Moskwa 1964.
- [4] Godecki L.: Hutnictwo. ZN Pł. Śl. nr 316, Gliwice 1972.
- [5] Steininger Z.: Ciągnięcie drutów stalowych. Wyd. Śląsk, Katowice 1975r.
- [6] Schneider M.: Ciągarstwo. Wyd. Śląsk, Katowice 1961.
- [7] Blerin I.Sz., Dniestrowskij N.Z.: Proizvodstvo miedniej i aluminievoj prowołoki. Izd. Miatzałurgija, Moskwa 1975.
- [8] Erabiec W.I.: Prowołoka iz tjażelych cwietynych mietalłow i spławow. Izd. Miatzałurgija, Moskwa 1984.
- [9] Oskędra K.: Praca badawcza NB-735/RM4/86 Pol. Śl., Gliwice 1986.

#### THE SEQUENCES OF WIRE SUCCESSIVE DEFORMATIONS

#### S u m m a r y

The paper discusses some recent views on distribution of successive deformations in the wire drawing process used in practice. The analytical models of the successive deformation sequences have been elaborated. The models have been compared to drawing practice.

## ЧИСЛОВАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОЧЕРЕДНЫХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ ПРОВОЛОК

## Р е з ю м е

В работе дано обсуждение известных взглядов на применяемые в практике очередные переходы для проволок при волочении. Разработаны аналитические модели числовых последовательностей очередных переходов и сравнены с практикой волочения.