

Stanisław Koncewicz

Analiza i porównanie wzorów do obliczania roztłoczenia przy walcowaniu gorącym

Przegląd ważniejszych wzorów do obliczenia roztłoczenia przy walcowaniu gorącym, opublikowanych w okresie od 1910 do 1954 roku. Analiza i podział wyliczonych wzorów w zależności od liczby uwzględnionych w nich czynników, wpływających na roztłoczenie. Wskazanie grupy wzorów, które można uważać za najlepsze pod względem teoretycznym. Wskazanie trudności przy praktycznym stosowaniu tych wzorów wobec braku wyczerpujących danych odnośnie do zależności współczynnika tarcia od różnych czynników wpływających na jego wielkość. Wykonanie przeliczeń roztłoczenia przy pomocy omówionych wzorów, porównanie uzyskanych wyników z danymi pomiarowymi zestawionymi przez Lendla [19] oraz wynikające stąd wnioski.

1. Stosowane oznaczenia

- b_0, h_0, l_0 — szerokość, wysokość, długość walcowanego pręta przed przepustem;
- b_1, h_1, l_1 — szerokość, wysokość, długość walcowanego pręta po przepuszczeniu;
- $\Delta b = b_1 - b_0$ — roztłoczenie bezwzględne — przyrost szerokości pręta;
- $\Delta h = h_0 - h_1$ — gniot bezwzględny;
- $G = \frac{\Delta h}{h_0}$ — gniot względny;
- $G\% = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100$ — gniot procentowy;
- $\beta = \frac{b_1}{b_0}$ — współczynnik roztłoczenia;
- $\gamma = \frac{h_1}{h_0}$ — współczynnik gniotu;
- $\lambda = \frac{l_1}{l_0}$ — współczynnik wydłużenia;
- $R, (D)$ — czynny promień (średnica) walców;
- $l_d = \sqrt{R\Delta h}$ — rzut długości łuku styku metalu z walcami na prostą prostopadłą do płaszczyzny przechodzącej przez osie walców;

- a — kąt chwytu;
 f — współczynnik tarcia metalu o walce;
 B — błąd procentowy.

2. Wstęp

Dobre kalibrowanie walców, należyście dobrane do warunków pracy danej walcowni jest podstawowym czynnikiem decydującym o jakości produkowanych wyrobów walcowanych oraz o kształtowaniu się kosztów własnych zakładu. Dobre kalibrowanie musi zapewniać:

- 1) uzyskanie dokładnych kształtów i wymiarów wyrobów walcowanych,
- 2) możliwie równomierne, w granicach wytrzymałości, obciążenie urządzeń mechanicznych,
- 3) możliwie najmniejsze zużycie walców,
- 4) możliwie optymalne wyzyskanie mocy napędów.

Wymagania podane w punkcie 1 prowadzą do określenia geometrycznych i fizycznych zewnętrznych warunków walcowania, wymagania punktów 2, 3 i 4 powodują konieczność rozwiązania energetycznych zagadnień związanych z procesem walcowania.

Geometryczne zależności pomiędzy wymiarami walcowanego metalu można ogólnie określić na podstawie zasady stałej objętości, którą można zapisać w postaci:

$$\beta \cdot \gamma \cdot \lambda = 1. \quad (1)$$

Ponieważ $\gamma = h_1/h_0$ można z łatwością wyliczyć na podstawie przyjętych z góry wielkości h_0 i h_1 , w równaniu (1) pozostają 2 niewiadome. Dla określenia wszystkich wymiarów walcowanego metalu konieczne jest zatem dodatkowe równanie, nie wynikające z zasady stałej objętości. Takim równaniem jest zazwyczaj równanie pozwalające na określenie wielkości roztlóczenia β .

3. Orientacyjny przegląd wzorów na roztlóczenie

Od z górá 50 lat różni badacze starali się ustalić na drodze eksperymentalnej i teoretycznej zależność roztlóczenia od różnych zewnętrznych warunków walcowania jak gniotu, początkowych wymiarów walcowanego pręta, średnicy walców, kształtu wykrojów, współczynnika tarcia metalu o walce, temperatury i składu chemicznego walcowanego metalu itp. Usiłowania te doprowadziły do ogłoszenia całego szeregu wzorów, z których ważniejsze podano w kolejności chronologicznej. We wszystkich tych wzorach wprowadzono jednolite oznaczenia zgodne z podanymi na wstępie.

Wzór Geuze'a [15], ok. 1900:

$$\Delta b = c \Delta h, \quad (2)$$

gdzie $c = 0,30 \div 0,35$ dla stali miękkiej.

Wzór Falka [11], 1910:

$$b_1^2 - b_0^2 = \frac{0,161 \Delta h b_0 (h_0 + h_1)}{h_1} \sqrt{\frac{R}{\Delta h}}. \quad (3)$$

Po prostych przekształceniach wzór ten można napisać w następującej postaci:

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{0,161 (h_0 + h_1)}{h_0} \frac{l_d}{b_0}}. \quad (3a)$$

Wzór Schelda [24], 1910:

$$\Delta b = \frac{R}{h_0} \Delta h \sin^2 \alpha. \quad (4)$$

Wzór Pietrowa [22], 1917:

$$\Delta b = c \frac{\Delta h}{h_1} l_d, \quad (5)$$

przy czym Pietrow stwierdza, że c jest zależne od stosunków b_0/h_0 i $\Delta b/h_1$. Winogradow [34] podaje wartości c dla wzoru Pietrowa w granicach $0,47 \div 0,68$ bez wskazań odnośnie do sposobu dobierania tej wartości w konkretnych przypadkach ruchowych. Goncezar [16] podaje następujące, nie związane z wielkościami $\frac{b_0}{h_0}$ i $\frac{\Delta b}{h_1}$, wartości współczynnika c dla wzoru Pietrowa:

$c = 0,15$ — przy walcowaniu w wykrojach zamkniętych,

$c = 0,35$ — przy walcowaniu stali niskowęglowej w walcach gładkich,

$c = 0,45$ — przy walcowaniu stali średnio- i wysokowęglowej w walcach gładkich.

Poza tym w miejsce h_1 we wzorze Pietrowa Goncezar podaje h_0 , przez co utożsamia go z wzorem Siebla (6).

Wzór Siebla [26], 1922:

$$\Delta b = c \frac{\Delta h}{h_0} l_d, \quad (6)$$

przy czym $c = 0,3 \div 0,4$ dla stali miękkiej. Siebel poleca przyjmowanie w obliczeniach średniej wartości $c = 0,35$.

Na podstawie prób przeprowadzonych przez Tafla i Anke ustalono:

$c = 0,36$ dla miedzi przy walcowaniu gorącym,

$c = 0,45$ i $0,29$ dla aluminium, przy czym wartości mniejsze należy przyjmować przy walcowaniu wlewków,

$c=0,33$ dla ołowiu.

Cziżikow [5] podaje wartość:

$c=0,45$ dla stali stopowych.

Wzór Sedlaczka [29], 1925:

$$\Delta b = c \frac{b_0 \sqrt{b_0 R} \cdot \Delta h}{b_0^2 + h_0 h_1}, \quad (7)$$

gdzie stała $c=1/3$ podana przez Sedlaczka została następnie poprawiona na $c=1/2,3$ na podstawie pomiarów Spenle'a [27] oraz Emicke i Pachaly'ego [10] przeprowadzonych przy walcowaniu stali miękkiej z szybkością ok. 3 m/sek.

Dla innych szybkości walcowania podano poprawkę:

$$C_v = \sqrt[4]{\frac{3,5}{0,5 + v}}, \quad (8)$$

gdzie v – szybkość walcowania w m/sek.

Skład chemiczny walcowanego materiału należy uwzględnić przy pomocy poprawki C_m podanej dla różnych stali w pracy [14]. Dla walcowania prętów o przekroju zbliżonym do kwadratu

$$\left(\text{przy założeniu } \frac{h_{sr}}{b_0} = 1 \text{ oraz } h_{sr} = \sqrt{h_0 h_1} \right).$$

Sedlaczek uprościł swój wzór (7) przy stałej $c=1/3$ do postaci:

$$\Delta b = \frac{\Delta h}{6} \sqrt{\frac{R}{h_0}}. \quad (9)$$

Uwzględniając jednak ostateczną postać pełnego wzoru Sedlaczka oraz przyjęte założenia upraszczające, uproszczony wzór Sedlaczka powinien mieć postać:

$$\Delta b = \frac{\Delta h}{4,6} \sqrt{\frac{R}{h_0}} \cdot C_m \cdot C_v. \quad (10)$$

Wzór Ekelunda [9], 1927:

$$\frac{1}{2} (b_1^2 - b_0^2) = 4 m l_d \Delta h - 2 m l_d (h_0 + h_1) \ln \frac{b_1}{b_0}, \quad (11)$$

gdzie

$$m = \frac{1,6 f l_d - 1,2 \Delta h}{h_0 + h_1},$$

$f = 1,05 - 0,0005 t$ dla walców stalowych,

$f = 0,8 (1,05 - 0,0005 t)$ dla walców żeliwnych utwardzonych,

t – temperatura walcowanego metalu w °C.

Przyjmując dla małych wielkości rozciągłości przybliżoną wielkość wyrażenia:

$$\ln \frac{b_1}{b_0} = \frac{b_1}{b_0} - 1,$$

wzór ten uproszczono do postaci:

$$b_1 = -A + \sqrt{A^2 + b_0^2 + 4ml_d(3h_0 - h_1)}, \quad (12)$$

gdzie $A = 2m(h_0 + h_1) \frac{l_d}{b_0}$.

Wzór Tafla i Knolla [31], 1931:

$$b_1 = \frac{b_0}{1 - \frac{\Delta h \sqrt[3]{\Delta h}}{2b_0 h_0 \sqrt[3]{c}} + \frac{(E - b_0/2)^4 \cdot c}{2b_0 h_0}} \quad \text{dla} \quad E < \frac{b_0}{2}, \quad (13)$$

gdzie

$$c = \frac{k}{D^2},$$

$k = 152$ dla stali przy walcowaniu gorącym,

$k = 69$ dla ołowiu w temperaturze otoczenia,

$k = 34,5$ dla miedzi w temperaturze 800°C ,

$k = 24,5$ dla aluminium w temperaturze $400 \div 450^\circ\text{C}$,

$$E = \sqrt[3]{\frac{\Delta h}{c}},$$

oraz

$$b_1 = \frac{b_0}{1 - \frac{\Delta h \sqrt[3]{\Delta h}}{2b_0 h_0 \sqrt[3]{c}}} \quad \text{dla} \quad E > \frac{b_0}{2}. \quad (13a)$$

Po prostych przekształceniach wzory te można doprowadzić do postaci:

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = 1 - \frac{\Delta h \sqrt[3]{\Delta h}}{2b_0 h_0 \sqrt[3]{c}} + \frac{\left(E - \frac{b_0}{2}\right)^4 c}{2b_0 h_0} \quad \text{dla} \quad E < \frac{b_0}{2}, \quad (13b)$$

oraz

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = 1 - \frac{\Delta h \sqrt[3]{\Delta h}}{2b_0 h_0 \sqrt[3]{c}} \quad \text{dla} \quad E > \frac{b_0}{2}. \quad (13c)$$

Wzór Trinksa [14], [34], [37], 1930:

$$\frac{\Delta b}{b_0} = -\frac{1}{2}(1+n) \pm \sqrt{\frac{nc}{1-c} + \left(\frac{1-n}{2}\right)^2}, \quad (14)$$

gdzie

$$c = \frac{\Delta h}{h_0},$$

$$n = 0,8 \frac{l_d}{h_0},$$

$$l_d = \sqrt{R\Delta h - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2}.$$

Wzór Zołotnikowa [41], 1934:

$$\Delta b = 0,66 \frac{\Delta h}{h_0 + h_1} l_d. \quad (15)$$

Wzór Gołowina [17], 1934:

$$\log \frac{b_1}{b_0} = \frac{1 + nk - (m + k)}{1 + nk} \log \frac{h_0}{h_1}, \quad (16)$$

gdzie

$$n = \frac{b_{sr}}{b_{sr} + h_{sr}},$$

$$b_{sr} = \frac{b_0 + b_1}{2},$$

$$h_{sr} = \frac{h_0 + h_1}{2},$$

$$m = \frac{1}{3} \frac{b_{sr}}{l_d} \quad \text{dla} \quad \frac{l_d}{b_{sr}} > \frac{2}{3},$$

$$m = 1 - \frac{3}{4} \frac{l_d}{b_{sr}} \quad \text{dla} \quad \frac{l_d}{b_{sr}} < \frac{2}{3},$$

$$k = \frac{\left[1 + \frac{1}{6} \left(\frac{b_{sr}}{h_{sr}} - 2\right)\right]^2 \frac{l_d}{h_{sr}}}{\left\{1 + \frac{1}{2} \left(2 - \frac{b_{sr}}{l_d}\right) f \left[1 + \frac{1}{6} \left(\frac{b_{sr}}{h_{sr}} - 2\right)\right] \frac{l_d}{h_{sr}}\right\} \left\{1 + \left(2 - \frac{b_{sr}}{l_d}\right) f \left[1 + \frac{1}{6} \left(\frac{b_{sr}}{h_{sr}} - 2\right)\right] \frac{l_d}{h_{sr}}\right\}}.$$

Wzór Riedla [23], 1936:

$$\Delta b = c \frac{b_0 \Delta h l_d}{b_0 h_0 + h_1 l_d}, \quad (17)$$

gdzie

$$c = \frac{c_1 l_d}{b_0},$$

$c_1 = 1,07$ przy walcowaniu z kwadratu,

$c_1 = 0,8$ przy walcowaniu profilów szerokich i niskich (taśmy uniwersalne, bednarka itp.).

Wzór Wrackiego [35], 1940:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{h_{0sr}}{h_{1sr}} (1 - m \operatorname{tg} \alpha), \quad (18)$$

gdzie $m = 0,46$ dla stali podeutektoidalnych.

Wzór Gubkina [18], 1947:

$$\Delta b = \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right) \left(f \cdot l_d - \frac{\Delta h}{2}\right) \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (19)$$

przy czym f oblicza się jak dla wzoru Ekelunda.

Wzór Wusatowskiego [36], [37], 1947:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \gamma^{-w}, \quad (20)$$

gdzie

$$w = -10^{-1,269 \varepsilon^{0,556} \delta},$$

$$\varepsilon = \frac{h_0}{D},$$

$$\delta = \frac{b_0}{h_0}.$$

Przy ustalaniu tego wzoru uwzględniono średnie warunki walcowania stali miękkiej. Chcąc uwzględnić wpływ innych warunków walcowania niż przeciętne, Wusatowski wprowadził w roku 1950 [38] szereg poprawek do swego wzoru nadając mu postać:

$$\beta' = acdf\beta = acdf\gamma^{-w}, \quad (21)$$

gdzie

a – poprawka dla temperatury,

c – poprawka dla szybkości walcowania,

d – poprawka dla gatunku walcowanej stali,

f – poprawka dla gatunku walców i stanu ich powierzchni.

Celem rozszerzenia stosowalności wzoru na stale stopowe opracowano w roku 1954 [40] dla niektórych gatunków stali stopowych wykresy podające zależność poprawki d od gniotu i temperatury walcowania. Wzór Wusatowskiego dla stali stopowych posiada więc postać:

$$\beta' = d\gamma^{-w}, \quad (21a)$$

przy czym γ^{-w} oblicza się jak dla stali miękkich.

Wzór Czekmariewa [4], 1948:

$$\log \frac{b_1}{b_0} = \frac{\log \frac{h_0}{h_1}}{1 + (1 + a) \left(\frac{b_0}{Ra}\right)^n}, \quad (22)$$

gdzie

$$\alpha - \text{kąt chwytu równy około } \sqrt{\frac{\Delta h}{R}},$$

$$n=1 \text{ dla } b_0 < Ra,$$

$$n=2 \text{ dla } b_0 > Ra.$$

Wzór Bachtinowa [1], [2], [3], 1950:

$$\Delta b = 1,15 \frac{\Delta h}{2h_0} \left(l_d - \frac{\Delta h}{2f} \right), \quad (23)$$

gdzie f oblicza się jak dla wzoru Ekelunda.

Wzór Tarnowskiego [32], 1952:

$$\log \frac{b_1}{b_0} = \log \frac{h_0}{h_1} \frac{k k_1}{k + \left(\frac{b_0}{l_d} \right)^{A'}}, \quad (24)$$

gdzie współczynniki k i k_1 uwzględniają wpływ kształtu narzędzia. Wartości liczbowe dla tych współczynników Tarnowski podaje w znacznie późniejszej swojej pracy [33] w roku 1954. W celu ułatwienia posługiwania się tym wzorem Tarnowski nadał swemu wzorowi postać:

$$\frac{\log \beta'}{\log \frac{1}{\gamma'}} = \frac{\log \beta}{\log \frac{1}{\gamma}} = \frac{k_1}{1 + \frac{A'}{k}}, \quad (24a)$$

przy czym dla wyznaczenia współczynników k' , k_1' i A' podaje cały szereg tablic i wykresów. Analizując wzór Tarnowskiego można wyrazić pogląd, że rozwój tego wzoru nie został jeszcze zakończony.

4. Ogólny podział wzorów na roztłoczenie

Wyliczone wzory można podzielić na 5 grup w zależności od liczby uwzględnionych w nich czynników wpływających na roztłoczenie.

Do grupy I można zaliczyć wzory podające zależność roztłoczenia jedynie od gniotu (np. wzór Geuze'a).

Grupę II stanowią wzory uwzględniające oprócz gniotu wielkość czynnej średnicy walców oraz wysokość walcowanego metalu (początkową, końcową lub średnią).

Wzory, w których uwzględniono dodatkowo początkową szerokość walcowanego pręta (w których zatem uwzględniono wszystkie czynniki geometryczne, wpływające na roztłoczenie przy walcowaniu w walcach gładkich), zaliczono do grupy III.

W grupie IV zebrano wzory uwzględniające obok geometrycznych warunków walcowania w walcach gładkich także warunki fizyczne (współ-

czynnik tarcia metalu o walce, temperaturę walcowania, rodzaj powierzchni i materiał walców, szybkość walcowania itp.).

Do grupy V należy zaliczyć wzory uwzględniające dodatkowo wpływ kształtu narzędzia na roztłoczenie. Spośród znanych dotychczas wzorów na roztłoczenie do grupy V można zaliczyć jedynie wzór Tarnowskiego (24).

Ponieważ wielkość współczynnika tarcia metalu o walce zależy głównie od rodzaju powierzchni i materiału walców, składu chemicznego i temperatury walcowanego metalu, szybkości walcowania oraz jednostkowych nacisków na walce, można wyrazić pogląd, że fizyczne warunki wpływające na roztłoczenie będą uwzględnione, jeśli zostanie uwzględniony wyznaczony odpowiednio współczynnik tarcia.

Niewłaściwe uwzględnienie któregośkolwiek z czynników fizycznych przy wyznaczaniu współczynnika tarcia pociąga za sobą niewłaściwe uwzględnienie wpływu tego czynnika na roztłoczenie, co oczywiście zwiększa błąd wyliczenia wielkości roztłoczenia.

Cały szereg wzorów uwzględnia wpływ fizycznych warunków walcowania za pomocą poprawek lub współczynników ogólnych $C_{(F)}$, których wielkość uzależniono od tych warunków, np. od składu chemicznego walcowanego metalu (Geuze, Siebel, Sedlaczek, Wusatowski), szybkości walcowania (Sedlaczek, Wusatowski), temperatury walcowania itp.

Współczynniki te wchodzi w skład wzorów na roztłoczenie w postaci:

$$Ab' = C_{n(F)}! Ab,$$

lub

$$\beta' = C_{n(F)}! \beta.$$

Każdy z tych współczynników (poprawek) bywa zwykle wyznaczony metodą porównywania danych doświadczalnych uzyskanych w różnych fizycznych warunkach walcowania z odnośnymi wielkościami obliczonymi za pomocą wzorów lub z wielkościami uzyskanymi przy ściśle określonych warunkach walcowania. Z tego powodu nie ujmuje one całości wpływu danych warunków fizycznych na roztłoczenie. Wyznaczone w ten sposób współczynniki i poprawki nie mogą natomiast nie obejmować pewnych skutków różnych wpływów ubocznych, które mogą być zupełnie inne w warunkach ruchowych niż w czasie przeprowadzania prób, co może prowadzić do znacznie większych błędów. Na tej podstawie poprawki te (ważne jedynie dla określonych przypadków szczególnych) pominięto w klasyfikacji odnośnych wzorów. Numery wzorów zaliczonych do każdej z grup oraz ogólną dla nich postać podano w tablicy I.

Nie ulega wątpliwości, że z teoretycznego punktu widzenia za najlepsze należy uznać wzory uwzględniające największą liczbę czynników wpływających na roztłoczenie. Wzory pomijające niektóre czynniki mu-

Ogólny podział wzorów na roztlóczenie

Lp.	Grupa	Ogólna postać wzoru	Wzory zaliczone do danej grupy		Średni błąd %	Kolejność wzoru		
			autor	nr		ogólna	w grupie	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	I	$\Delta b = \varphi(\Delta h)$	Geuze	2	13,14	16	—	
2	II	$\Delta b = \varphi(\Delta h, R, h_0)$	Scheld	4	7,08	8	3	
3			Pietrow	5	15,63	18	6	
4			Siebel	6	5,82	7	2	
5			Sedlaczek upr.	9	10,62	13	5	
6			Sedlaczek upr. II	10	9,79	11	4	
7			Zołotnikow	15	4,37	2(3)	1	
8	III	a)	Sedlaczek	7	7,24	9	4	
9		$\Delta b = \varphi(\Delta h, R, h_0, b_0)$	Trinks	14	9,66	10	5	
10			Riedel	17	28,58	20	6	
11		b)	$\beta = \varphi(\Delta h, R, h_0, b_0)$	Falk	3	16,82	19	8
12				Wracki	18	12,60	15	7
13				Wusatowski	20	4,42	4(5)	2(3)
14				Wusatowski	21	5,24	5(1)	3(1)
15				Wusatowski	21a	—	—	—
16				Czekmariew	22	4,40	3(4)	1(2)
17		Tafel-Knoll	13	39,71	14	9		
18	IV	a)	Gubkin	19	13,74	17	5	
19		$\Delta b = \varphi(\Delta h, R, h_0, b_0, f)$	Bachtinow	23	5,54	6	2	
20			b)	Ekelund	11	2,79	1(2)	1
21		$\beta = \varphi(\Delta h, R, h_0, b_0, f)$	Ekelund upr.	12	10,30	12	3	
22			Gołowin	16	10,63	14	4	
23		V	$\beta = \varphi(\Delta h, R, h_0, b_0, f, k)$	Tarnowski	24	—	—	—

*) Liczby w nawiasach podano wg pracy [38]

szą być obciążone większym lub mniejszym błędem, w zależności od wielkości wpływu pominiętego czynnika na roztlóczenie. Z tego powodu za najbardziej ogólne należy uznać wzory grupy V. Jedynym w chwili obecnej przedstawicielem tej grupy — wzór Tarnowskiego (24) — oparty jest jednak na znacznej liczbie założeń upraszczających, obniżających jego praktyczną przydatność.

Równie wyczerpujące pod względem teoretycznym przy walcowaniu w wałkach gładkich są wzory grupy IV. O prawidłowości teoretycznych powiązań uwzględnionych w nich czynników może rozstrzygnąć jednak w chwili obecnej jedynie praktyka. Dużą trudność w praktycznym spraw-

dzaniu tych wzorów przedstawia właściwe wyznaczenie wielkości współczynnika tarcia w zależności od temperatury i chemicznego składu walcowanego metalu, szybkości walcowania, rodzaju i stanu powierzchni walców, nacisków na walce itp.

Zasadniczą wadą wzorów grupy III jest pominięcie jednego z głównych czynników wpływających na rozciągłość, jakim jest tarcie metalu o walce. Jedynie wzory Wusatowskiego, jako wzory statystyczne, uwzględniają przeciętny wpływ tarcia na wielkość rozciągłości.

Wzory pozostałych dwu grup, I i II, uwzględniają zbyt małą liczbę czynników wpływających na rozciągłość. Z tego powodu nie można polecać ich do praktycznego zastosowania. Wyjątek stanowi tu wzór Zołotnikowa (15), którym można z powodzeniem posługiwać się przy obliczeniach orientacyjnych.

5. Porównanie wzorów na rozciągłość

Niewątpliwie najprostszym i najbardziej rozpowszechnionym z podanych wzorów jest wzór Geuze'a (2). Jest on bardzo poręczny w użyciu, jednak z uwagi na małą dokładność stosowany jest dotychczas tylko do przeliczeń orientacyjnych.

Czizikow [6] wykazał na podstawie przeprowadzonej analizy wzorów (2), (3), (4), (5), (6), (7), (9), (14), (15), (16), (17), (19) i (23), że wzory Zołotnikowa (15), Gubkina (19) i Bachtinowa (23) dają wyniki najbardziej zbliżone do wielkości rzeczywistych. Do praktycznego stosowania poleca jednak tylko wzór Gubkina.

Riedel [23] przeprowadził porównawcze obliczenia rozciągłości wzorami (2), (3), (6) i (17) opierając się na danych z doświadczeń Falka, Puppego i Tafla oraz Sedlaczka. Zestawienie wyników tych obliczeń nie przemawia na korzyść żadnego z tych wzorów.

Lendl [19] przeprowadził porównanie rozciągłości obliczonego przy pomocy wzorów (2), (4), (6), (9), (11), (12) i (14). Na podstawie porównania uzyskanych wyników z danymi doświadczalnymi Lendl poleca jako najdokładniejszy wzór Ekelunda (11).

Wusatowski [37] uzupełnił tablice zestawione przez Lendla obliczeniami przeprowadzonymi przy pomocy wzorów (7) oraz (20). Na podstawie podanych przez Wusatowskiego zestawień można stwierdzić, że wzór Ekelunda (11) daje wyniki obciążone najmniejszym błędem. Drugim co do dokładności wyników jest pierwszy wzór Wusatowskiego (20).

W roku 1954 Czizikow [8] przeprowadził dodatkowo analizę porównawczą wzorów (16), (22) i (24). Wskazuje on na ogólne podobieństwo wzorów Czekałmariewa (22) i Tarnowskiego (24) do najwcześniejszego logarytmicznego wzoru na rozciągłość (16), podanego przez Gołowina. Stwier-

dza przy tym, że wzór Golowina może „prawidłowo odzwierciedlać zależności roztłoczenia od gniotu względnego“, jeżeli zostanie odpowiednio dobrane wyrażenie:

$$\frac{1 + nk - (m + k)}{1 + nk}$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy [8] Cziżikow wyraża pogląd, że wzór Czekmariewa jest poprawny pod względem teoretycznym i daje wyniki zbliżone do danych doświadczalnych.

Praktyczne porównanie wzorów można przeprowadzić porównując wyniki obliczeń uzyskane dla tych samych prób przy pomocy odnośnych wzorów z danymi pomiarowymi. Porównanie błędów wyliczonych przy pomocy różnych wzorów na podstawie różnych danych doświadczalnych można traktować orientacyjnie.

W celu porównania praktycznej przydatności wyliczonych przez autora wzorów, autor uzupełnił tablicę podaną przez Lendla [19] obliczeniami przeprowadzonymi przy pomocy nie uwzględnionych w niej wzorów. Wyniki obliczeń podano w tablicy II. W miejsce podanych przez Lendla wielkości b_1 wyliczonych wzorem Ekelunda przy pomocy suwaka Mogiliańskiego autor podał w tablicy II wielkości b_1 wyliczone przez siebie drogą kolejnych podstawień. Przy obliczaniu roztłoczenia poprawionym wzorem Wusatowskiego (21) przyjęto poprawki dla temperatury i szybkości walcowania zgodnie z zaleceniami podanymi w pracy [38]. Dla prób zaczerpniętych z pracy [10] uwzględniono szybkości walcowania podane w tablicy II.

Niektóre z podanych przez Lendla [19] prób (np. próby nr 16, 17, 21, 23) zostały zaczerpnięte z pracy [29], w której niestety brak danych odnoszących się do szybkości walcowania. Dla prób 1 ÷ 6 oraz próby nr 20 nie udało się autorowi odnaleźć w dostępnej literaturze żadnej dodatkowej wzmianki o warunkach, w jakich zostały one przeprowadzone.

Dla wszystkich prób, odnośnie do których brak danych o szybkości walcowania, autor założył przy obliczaniu roztłoczenia poprawionym wzorem Wusatowskiego stałą szybkość walcowania równą ok. 2 m/sek. Biorąc pod uwagę prawdopodobieństwo nieznacznych odchyień szybkości walcowania w czasie przeprowadzania prób od przyjętej wielkości średniej oraz niewielkie nachylenie prostych podających zależność poprawki c od szybkości walcowania [38], można twierdzić, że błąd spowodowany przyjętym przez autora założeniem będzie mniejszy niż 0,3%.

W tablicy III podano procentowe błędy wyliczeń w stosunku do danych pomiarowych. Z tablicy tej widać, że przy walcowaniu kwadratów o boku mniejszym niż 10 mm większość wzorów daje wyniki obarezone błędem przekraczającym 10%. Przy walcowaniu przekrojów płaskich

Porównanie roztlócenia obliczonego różnymi wzorami

Tablica II

Lp.	h_0 mm	b_0 n.m	h_1 mm	b_1 pomierz. mm	D mm	T °C	v m/sek	b_1 obliczone wzorem nr (w mm)																							Uwagi
								2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
1	5,1	5,4	2,2	11,2	290	870	—	6,8	9,2	9,1	14,90	9,5	10,1	8,0	8,8	11,16	9,4	15,0	9,8	10,8	6,10	18,9	11,5	14,86	9,94	10,22	10,65	11,05	walce stalowe		
2	5,9	6,0	1,9	14,7	290	900	—	8,0	11,5	14,4	23,70	11,7	12,5	9,3	10,3	15,03	11,6	22,6	13,2	14,1	7,05	28,8	17,2	20,20	13,53	14,07	14,40	14,10			
3	6,8	7,0	3,1	12,3	290	900	—	8,8	11,5	11,2	16,60	11,4	12,9	9,8	10,6	13,61	11,7	13,8	12,0	12,7	7,95	20,2	14,2	17,10	12,07	12,40	12,50	13,25			
4	7,7	7,7	4,5	12,0	280	920	—	9,5	11,3	10,1	12,96	11,0	11,5	10,2	11,0	12,16	11,6	11,5	10,3	11,2	8,46	15,2	12,6	14,10	11,33	11,45	11,15	12,10			
5	8,6	9,0	3,4	18,0	280	980	—	11,6	14,1	16,6	23,50	16,7	15,5	12,5	13,6	18,10	15,9	16,8	16,8	16,7	10,60	26,9	20,7	18,20	16,42	17,29	17,55	16,35			
6	10,8	11,0	4,0	22,5	280	1020	—	14,4	17,7	22,7	29,40	17,8	18,8	15,1	16,3	22,11	19,8	19,5	21,0	20,4	13,30	32,4	26,7	17,00	20,29	21,42	22,40	19,32			
7	20,0	20,0	15,8	22,0	240	1000	3,54	22,1	23,8	21,1	21,77	21,7	22,7	21,7	22,2	22,58	22,8	21,3	22,2	21,7	21,26	23,0	23,1	22,00	22,44	22,71	22,40	22,08			
8	24,0	24,0	12,0	33,5	250	950	3,48	30,0	32,0	35,6	37,50	30,8	31,9	28,6	30,0	34,85	35,1	29,2	34,3	32,5	28,90	42,6	40,7	32,85	32,88	34,17	31,50	31,37			
9	28,3	28,3	21,9	32,0	250	1000	3,67	31,5	33,2	30,2	31,20	30,5	31,6	30,5	31,2	31,75	31,8	29,9	31,8	30,8	30,35	32,2	32,7	30,87	31,53	31,96	31,70	31,03			
10	31,0	31,0	22,9	34,0	230	1000	3,42	35,0	36,3	33,8	34,68	33,8	36,6	33,6	34,4	34,97	35,6	33,0	35,3	34,0	33,80	35,6	36,6	34,10	34,72	35,30	35,30	34,20			
11	36,5	36,5	30,3	40,0	370	1050	1,58	39,6	42,0	37,8	38,92	38,8	39,8	38,8	39,5	39,42	39,9	38,0	39,6	38,6	38,30	39,7	40,2	38,72	39,68	40,06	39,40	39,10			
12	41,7	41,7	27,1	52,1	390	900	1,56	49,1	51,3	49,6	51,70	48,4	50,2	47,0	48,6	52,21	53,2	46,2	52,2	49,1	46,65	55,4	55,8	50,26	50,16	31,80	51,70	49,32			
13	50,0	50,0	30,0	61,0	370	950	1,69	60,0	61,7	62,9	64,20	58,2	60,3	56,4	58,3	62,45	64,2	55,8	64,0	60,0	57,50	68,3	70,0	60,10	60,80	62,73	64,00	59,00			
14	57,0	57,0	41,0	63,6	403	1050	2,53	65,0	68,1	63,1	64,75	62,6	64,6	62,0	63,5	64,30	65,9	61,0	65,8	63,1	62,30	67,0	68,5	62,70	64,41	53,69	66,20	63,10			
15	82,2	82,2	57,1	95,7	570	1100	2,33	90,6	97,5	93,0	95,20	91,7	94,2	90,0	92,4	33,13	96,0	88,4	96,5	92,3	90,90	98,8	101,0	90,68	93,87	95,93	97,50	91,55			
16	17,2	25,2	15,6	25,9	315	1050	—	26,1	27,7	25,5	25,77	25,6	26,5	26,0	26,2	25,96	26,0	25,8	26,1	25,7	25,60	25,8	26,6	25,80	26,36	26,37	25,85	25,95	walce żeliwne		
17	9,35	29,3	8,0	30,0	230	950	—	28,0	31,5	29,5	30,04	29,9	29,9	30,1	30,3	30,18	30,3	29,4	30,6	29,9	29,80	29,8	32,5	30,13	30,30	30,50	30,00	30,21			
18	19,0	36,2	13,1	39,9	230	1000	3,38	39,2	41,1	38,8	40,03	39,0	40,0	38,6	39,3	40,22	41,0	38,2	41,8	39,4	38,70	39,3	46,8	39,67	39,67	40,54	40,70	39,66			
19	13,1	39,9	10,9	41,9	240	950	3,54	41,0	43,8	40,3	41,05	40,8	41,3	41,0	41,3	42,73	41,4	39,5	41,7	40,9	40,75	46,5	45,0	41,15	41,22	41,57	40,90	41,24			
20	4,4	48,6	2,9	50,1	280	1050	—	49,4	51,5	49,2	51,22	50,3	49,7	50,0	50,4	50,30	50,5	44,8	53,4	50,6	49,50	49,6	70,2	51,05	49,04	50,57	49,50	51,10			
21	19,8	60,1	15,3	62,5	387	1150	—	62,4	65,6	61,0	63,14	62,4	63,3	62,5	63,2	62,56	63,4	61,2	64,8	62,6	61,60	63,0	72,1	62,60	62,98	63,97	62,90	63,17			
22	39,1	70,0	28,5	79,0	601	750	2,59	73,5	83,0	74,0	77,35	75,4	77,9	74,9	76,4	80,08	81,1	74,2	79,5	75,6	74,50	76,2	87,6	78,50	77,42	79,27	78,10	77,13			
23	15,5	79,9	12,0	81,0	387	1100	—	81,3	84,3	81,6	82,16	81,6	81,8	81,6	82,2	81,82	81,9	70,5	83,4	81,7	80,75	80,7	96,2	81,90	81,25	82,53	81,30	82,31			
24	58,4	91,4	40,5	103,5	580	840	2,38	97,4	104,5	99,2	102,32	99,1	102,2	98,0	100,0	104,01	106,2	97,0	105,1	100,0	99,00	100,4	116,2	102,40	101,16	103,56	103,20	100,95			
25	40,5	103,4	27,9	113,8	601	840	2,46	107,7	114,8	109,4	113,36	110,2	111,9	109,2	110,0	113,95	116,2	107,5	116,4	110,9	108,6	109,9	135,6	113,50	111,16	114,16	112,70	112,16			
26	38,0	113,5	23,0	123,0	598	1060	2,44	118,5	127,2	123,5	128,80	122,7	123,4	120,5	122,6	127,46	128,9	118,5	135,5	124,4	121,4	114,4	167,5	124,75	122,81	125,50	129,50	124,62			
27	76,0	131,0	60,8	136,5	570	750	2,57	136,1	142,9	134,7	136,80	135,6	139,9	135,9	137,4	137,68	139,1	126,0	139,9	135,8	135,4	134,8	145,8	137,70	136,76	139,19	137,20	137,50			

Zestawienie błędów wzorów 2—23 wg danych tablicy II

Lp.	B ł ą d w z o r u nr (w %)																				
	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	-39,30	-17,85	-18,75	+33,00	-15,20	-9,80	-28,60	-21,40	-0,36	-16,08	+33,90	-12,50	-3,57	-45,50	+68,70	+2,68	+32,60	-11,25	-8,75	-4,90	-1,34
2	-45,60	-21,75	-2,04	+61,20	-20,40	-15,00	-36,75	-29,25	+2,24	-21,10	+53,70	-10,20	-4,08	-52,00	+96,00	+17,00	+37,40	-7,96	-4,28	-2,04	-4,08
3	-28,40	-6,50	-8,95	+35,00	-7,32	+4,88	-20,30	-13,85	+10,65	-4,87	+12,20	-2,44	+3,25	-35,40	+64,20	+15,45	+39,00	-1,87	+0,81	+1,64	+7,78
4	-20,80	-5,84	-15,80	+8,00	-8,33	-4,17	-15,00	-8,33	+1,33	-3,33	-4,16	-14,16	-6,66	-29,50	+26,65	+5,00	+17,50	-5,58	-4,50	-7,04	+0,83
5	-35,50	-21,65	-7,78	+30,50	-7,22	-13,90	-30,55	-24,45	+0,56	-11,66	-6,67	-6,66	-7,22	-41,10	+49,50	+15,00	+1,11	-8,80	-3,55	-2,50	-9,13
6	-36,00	-21,30	+0,89	+30,70	-20,90	-16,44	-32,85	-27,50	-1,73	-12,00	-13,34	-6,66	-9,34	-40,80	+44,00	+18,65	-24,40	-9,82	-4,80	-0,44	-14,12
7	+0,45	+8,18	-4,08	-1,04	-1,36	+3,18	-1,36	+0,91	+2,64	+3,64	-3,18	+0,91	-1,36	-3,36	+4,55	+5,00	+0,00	+2,00	+3,22	+1,82	+0,36
8	-10,45	-4,48	+6,27	+11,95	-8,06	-4,88	-14,65	-10,45	+4,03	+4,78	-12,82	+0,24	-2,98	-13,73	+27,20	+21,50	-1,94	-1,85	+2,00	-5,96	-6,36
9	-1,56	+3,75	-5,62	-2,50	-4,69	-1,25	-4,68	-2,50	-0,78	-0,62	-6,57	-0,63	-3,75	-5,16	+0,62	+2,18	-3,53	-1,50	-0,12	-0,94	-3,03
10	+2,94	+6,76	-0,59	+2,00	-0,59	+7,65	-1,18	+1,18	+2,85	+4,70	-2,94	+3,82	+0,00	-0,59	+4,71	+7,65	+0,29	+2,12	+3,82	+3,82	+0,59
11	-1,00	+5,00	-5,50	-2,70	-3,00	-0,50	-3,00	-1,25	-1,45	-0,25	-5,00	-1,00	-3,50	-4,25	-0,75	+0,50	-3,20	-0,80	+0,15	-1,50	-2,25
12	-5,76	-1,53	-4,80	-0,77	-7,11	-3,65	-9,80	-6,71	+0,21	+2,11	-11,32	+0,19	-5,76	-10,46	+6,34	+7,10	-3,53	-3,76	-0,58	-0,77	-5,34
13	-1,64	+1,15	+3,11	+5,25	-4,59	-4,43	-7,55	-4,43	+2,48	+5,24	-8,53	+4,92	-1,64	-5,73	+11,95	+14,75	+0,16	-0,33	+2,87	+4,92	-3,28
14	+2,20	+7,06	-0,79	+1,81	-1,57	+1,57	-2,52	-0,16	+1,10	+3,61	-4,09	+3,46	-0,78	-2,04	+5,35	+7,70	-1,41	+1,27	+3,29	+4,09	-0,79
15	-5,32	+1,88	-2,82	-0,52	-4,18	-1,57	-5,96	-3,44	-0,60	+0,31	-7,83	+0,84	-3,55	-5,02	+3,24	+5,54	-5,24	-1,91	+2,40	+1,88	-4,75
16	+0,77	+6,95	-1,54	-0,50	-1,16	+2,32	+0,39	+1,16	+0,23	+0,39	-0,39	+0,77	-0,77	-1,16	-0,39	+1,93	-0,39	+1,78	+1,81	+0,19	+0,02
17	-0,67	+5,00	-1,67	+0,13	-0,33	+0,33	+0,33	+1,00	+0,60	+1,00	-2,00	+2,00	-0,33	-0,66	-0,67	+8,35	+0,43	+1,00	+1,67	-0,00	+0,70
18	-1,75	+3,01	-2,76	+0,33	-2,26	+0,25	-3,26	-1,50	+0,80	+27,6	-4,27	+4,76	-1,25	-3,01	-1,50	+17,30	-0,58	+0,58	+1,60	+2,00	-0,60
19	-0,96	+4,53	-2,62	-2,03	-1,43	+0,24	-0,95	-1,43	+1,98	-0,00	-5,73	+0,72	-2,39	-2,74	+11,00	+7,40	-1,79	-1,62	+0,79	-2,38	-1,58
20	-1,40	+2,79	-1,79	+2,23	+0,40	-0,60	-0,20	+0,60	+0,40	+0,80	-10,56	+6,60	+1,00	-1,20	-1,00	+40,20	+1,89	-2,12	+0,94	-1,20	+2,00
21	-0,16	+4,96	-2,40	-1,02	-0,16	+1,28	+0,00	+1,12	+0,10	+1,44	-2,08	+3,68	+0,16	-1,44	+0,80	+15,36	+0,16	+0,77	+2,35	+0,64	+1,07
22	-6,96	+5,06	-6,33	-2,09	-4,56	-1,39	-5,20	-3,29	+1,37	+2,66	-6,08	+0,63	-3,92	-5,70	-3,54	+10,88	-0,63	-2,00	+0,34	-1,14	-2,33
23	+0,25	+4,07	+0,62	+1,43	+0,62	+0,86	+0,62	+1,48	+1,00	+0,99	-12,95	+2,84	+0,87	-0,31	-0,37	+18,75	+1,11	+0,31	+1,89	+0,37	+1,62
24	-5,90	+0,97	-4,15	-1,14	-4,25	-1,26	-5,32	-3,39	+0,49	+2,61	-6,28	+1,55	-3,38	-4,35	-3,00	+12,35	-1,08	-2,26	+0,08	-0,29	-3,43
25	-5,36	+0,88	-3,87	-0,39	-3,16	-1,67	-4,04	-3,34	+0,13	+2,11	-5,54	+2,28	-2,55	-4,57	-3,43	+19,15	-0,26	-2,32	+0,32	-0,97	-1,44
26	-3,66	+3,41	+0,41	+4,72	-0,24	+0,33	-2,03	-0,32	+3,63	+4,80	-3,74	+10,15	+1,14	-1,30	-7,00	+36,20	+1,42	-0,15	+2,03	+5,28	+1,32
27	-0,29	+4,68	-1,32	+0,22	-0,66	+1,61	-0,44	+0,66	+0,86	+1,90	-7,68	+2,49	-0,51	-0,81	-1,24	+6,80	-0,88	+0,15	+1,97	+0,51	+0,74
	-260,44	100,90	105,97	14,70	132,73	80,84	236,19	166,99	4,92	69,91	153,75	54,25	69,29	287,39	22,89		48,86	66,48	27,77	32,07	63,85
	22	8	22	11	25	16	23	19	5	9	24	8	21	27	11		14	19	8	15	16
	+6,61	80,09	11,30	228,47	1,02	24,17	1,34	8,11	40,08	45,85	99,8	52,85	6,42		424,81	340,27	133,07	7,40	33,56	27,16	17,03
	5	19	5	16	2	11	4	8	22	18	3	19	6		16	27	13	8	9	12	11

i szerokich błęd procentowy na ogół znacznie maleje. Pamiętać jednak należy, że zmniejszenie błędu procentowego przy wzroście szerokości walcowanego metalu nie zawsze bywa połączone ze zmniejszeniem błędu bezwzględnego.

Aby zmniejszyć wpływ różnych czynników przypadkowych na wielkość błędu, obliczono średni błąd dla każdego wzoru na podstawie wartości podanych w tablicach II i III. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tablicy IV. W tablicy tej podano dla poprawionego wzoru Wusatow-

Tablica IV

Zestawienie błędów średnich

Lp.	Wzór nr	Autor	Średni błąd procentowy			Kolejność wzoru
			+	-	sumaryczny	
1	2	3	4	5	6	7
1	2	Geuze	11,82	1,32	13,14	16
2	3	Falk	12,60	4,22	16,82	19
3	4	Scheld	4,82	2,26	7,08	8
4	5	Pietrow	1,33	14,30	15,63	18
5	6	Siebel	5,32	0,50	5,82	7
6	7	Sedlaczek (pełny)	5,05	2,19	7,24	9
7	9	Sedlaczek i Tafel (upr.)	10,28	0,34	10,62	13
8	10	Sedlaczek (upr. popraw.)	8,78	1,01	9,79	11
9	11	Ekelund (pełny)	0,97	1,82	2,79	1 (2)
10	12	Ekelund (uproszczony)	7,76	2,54	10,30	12
11	13	Tafel i Knoll	6,41	33,30	39,71	21
12	14	Trinks	6,78	2,88	9,66	10
13	15	Zolotnikow	3,30	1,07	4,37	2 (3)
14	16	Gołowin	10,63	—	10,63	14
15	17	Riedel	2,08	26,50	28,58	20
16	18	Wracki	—	12,60	12,60	15
17	19	Gubkin	3,49	10,25	13,74	17
18	20	Wusatowski I	3,50	0,92	4,42	4 (5)
19	21	Wusatowski (poprawiony)	3,47	1,77	5,24	5
20	21	Wusatowski (poprawiony) (błąd podano na podstawie pracy [38])	0,85	1,39	2,24	— (1)
21	22	Czekmariew	2,14	2,26	4,40	3 (4)
22	23	Bachtinow	3,99	1,55	5,54	6

skiego (21) obok błędu wyliczonego zgodnie z przyjętymi przez autora założeniami także średni błąd wyliczony na podstawie innych danych doświadczalnych [38].

Uwzględniając obliczenia autora można na podstawie tablicy IV ustalić następującą kolejność kilku najdokładniejszych wzorów:

- | | |
|----------------------------------|------|
| 1) wzór Ekelunda | (11) |
| 2) wzór Zolotnikowa | (15) |
| 3) wzór Czekmariewa | (22) |
| 4) wzór Wusatowskiego | (20) |
| 5) wzór Wusatowskiego poprawiony | (21) |
| 6) wzór Bachtinowa. | (23) |

Uwzględniając średni błąd poprawionego wzoru Wusatowskiego podany w pracy [38] kolejność tych wzorów będzie następująca:

- | | |
|----------------------------------|------|
| 1) wzór Wusatowskiego poprawiony | (21) |
| 2) wzór Ekelunda | (11) |
| 3) wzór Zolotnikowa | (15) |
| 4) wzór Czekmariewa | (22) |
| 5) wzór Wusatowskiego | (20) |
| 6) wzór Bachtinowa. | (23) |

Z przytoczonych sześciu najdokładniejszych wzorów jedynie wzory Ekelunda (11) i Bachtinowa (23) uwzględniają wpływ współczynnika tarcia na wielkość roztłoczenia. Ze wzrostem współczynnika tarcia rośnie wielkość obliczonego tymi wzorami roztłoczenia, co pokrywa się z danymi z praktyki. Poprawiony wzór Wusatowskiego uwzględnia wpływ zmian współczynnika tarcia pośrednio, przez wprowadzenie poprawek zależnych od temperatury i szybkości walcowania. Jednakże poprawka dla temperatury ($\alpha = 1,005$ dla temperatur w zakresie $950-840^\circ\text{C}$ [38]) rozdziela zakres temperatur walcowania na dwa przedziały, w których dla pozostałych niezmiennych warunków walcowania roztłoczenie pozostaje stałe, podczas gdy współczynnik tarcia (a więc i roztłoczenie) zmienia się z temperaturą w sposób ciągły.

Poprawka na szybkość walcowania [38] wykazuje dla pewnych gnio-tów wzrost roztłoczenia, dla innych spadek roztłoczenia ze wzrostem szybkości walcowania. Liczne doświadczenia ([10], [27], [28], [38]) wykazały, że wraz ze wzrostem szybkości walcowania współczynnik tarcia maleje, a wraz z nim maleje zawsze roztłoczenie.

Wzory Zolotnikowa (15) i Bachtinowa (23) pomijają wpływ początkowej szerokości walcowanego pręta na roztłoczenie. Praktyka oraz liczne doświadczenia ([20], [21], [30]) wykazały, że nawet przy walcowaniu zimnym [20] nie można pomijać wpływu początkowej szerokości walcowanego pręta na roztłoczenie. Mimo dużej dokładności tych wzorów ((15) i (23)) nie można ich więc polecić do obliczania roztłoczenia przy kalibrowaniu. Wzory te (szczególnie wzór Zolotnikowa) mogą być używane jedynie do obliczeń orientacyjnych.

Wzory Ekelunda (11), Wusatowskiego (20) i (21) oraz Czekmariewa (22) są w takim stopniu skomplikowane, że bezpośrednio posługiwanie się nimi jest dość pracochłonne.

Celem ułatwienia obliczeń wzorem Wusatowskiego (20), Wojtylak [39] skonstruował specjalny suwak, pozwalający na znaczne skrócenie czasu potrzebnego do przeprowadzenia obliczeń. Przy stosowaniu poprawionego wzoru Wusatowskiego (21), należy przeprowadzać obliczenia przy pomocy suwaka Wojtylaka oraz logarytmów lub maszyna do liczenia. Okoliczność ta w znacznym stopniu utrudnia stosowanie wzoru (21).

Celem ułatwienia obliczeń wzorem Ekelunda (11), autor skonstruował specjalny suwak, pozwalający na obliczenie rozciągłości wzorem (11) w czasie kilkudziesięciu sekund. Przy pomocy tego suwaka autor przelecił rozciągłość dla prób podanych w tabelicy II. Średni błąd obliczeń przy pomocy tego suwaka dla podanych przykładów wynosi 2,47% w stosunku do danych pomiarowych oraz 0,26% w stosunku do wyników uzyskanych drogą kolejnych podstawień.

Obliczenia wzorem Czekmariewa (22) muszą być przeprowadzane na drodze arytmetycznej, ponieważ dotychczas nie opracowano dla tego wzoru żadnych nomogramów ani innych pomocy ułatwiających obliczenia tym wzorem.

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy i porównania 22 wzorów na rozciągłość, wzory te podzielono pod względem teoretycznym na 5 grup (tabl. I), przy czym do grup wyższych zaliczono wzory uwzględniające większą liczbę czynników wpływających na rozciągłość.

Do obliczeń orientacyjnych można polecić wzór Zołotnikowa (15) lub wzór Bachtinowa (23).

W obliczeniach roboczych przy kalibrowaniu wałków należy posługiwać się poprawionym wzorem Wusatowskiego (21) (obliczenia należy przeprowadzić specjalnym suwakiem i maszyną do liczenia), lub wzorem Ekelunda (11) (obliczenia należy przeprowadzać specjalnym suwakiem do wzorów Ekelunda).

Przy interpretowaniu wyników obliczeń należy pamiętać, że wszystkie dotychczasowe wzory obciążone są błędami, których średnie wielkości podano w tabelicy IV.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Б. П. Бахтинов, *Некоторые вопросы теории прокатки*, „Сталь“ 1946, nr 4–5; także [3] i [34].
- [2] Б. П. Бахтинов и М. М. Штернов, *Калибровка валков и швеллеров*, Metallurgizdat, 1950.
- [3] Б. П. Бахитов и М. М. Штернов, *Калибровка прокатных валков*, Metallurgizdat, 1953.

- [4] А. П. Чекмарев. *Уширение при прокатке. Научные труды Днепропетровского металлургического института*, вып. XII, 1948. Omówienie pracy patrz [8].
- [5] Я. М. Чижиков, *Влияние состава стали на уширение при прокатке*, „Сталь“ 1945, str. 403, także [14].
- [6] Я. М. Чижиков, *Закономерности уширения при прокатке и анализ формул для его определения*, „Сталь“ 1948, nr 11, także [34].
- [7] Я. М. Чижиков, *Прокатное производство*, Металлургиздат, 1952.
- [8] Я. М. Чижиков, *Логарифмические формулы для расчёта уширения при прокатке*. Сборник статей: *Обработка металлов давлением*, ч. III. Металлургиздат, 1954.
- [9] S. Ekelund, *Några dynamiska förhållanden vid valsning*, „Jernkontorets Annaler“, 1927, str. 39; streszczenie patrz [14].
- [10] O. Emicke i E. Pachaly, *Das Breiten beim Walzen bei verschiedenen Walzgeschwindigkeit und Stahlzusammensetzung*, „Stahl u. Eisen“, 1936, str. 589.
- [11] A. Falk, *Die Breitung des Eisens in Glattwalzen*, „Stahl u. Eisen“, t. XXX, 1910, str. 164—166.
- [12] Я. С. Галлай, *Материалы по теории прокатки*, ч. I, 1934.
- [13] Я. С. Галлай, *Материалы по теории прокатки*, ч. III, 1941.
- [14] Я. С. Галлай, *Материалы по теории прокатки*, т. IV, 1948.
- [15] L. Geuze, *Laminage du fer et de l'acier*, Paris 1921.
- [16] В. В. Гончар, *Атлас номограмм по прокатке*. Металлургиздат, 1954.
- [17] А. Ф. Головин, *Прокатка*, ч. II, ОНТИ 1934; także [8].
- [18] С. Я. Губкин, *Теория обработки металлов давлением*, Металлургиздат 1947; także [34].
- [19] A. E. Lendl, *Roll more tons*, „Iron and Steel“, 1941; streszczenie patrz „Stahl u. Eisen“ 1943, str. 480; także [34] i [37].
- [20] W. Lueg i A. Pomp, *Der Einfluss des Walzenwerkstoffes, der Walzgeschwindigkeit, der Bandbreite und einer vorausgegangenen Kaltverformung beim Kaltwalzen*, Mittell. K. W. Instit. für Eisenforsch., 1935, str. 219; także [13].
- [21] N. Metz, *Recherches expérimentales sur le laminage à chaud*, „Revue de Metallurgie“ 1925, str. 1 i 66; sprawozdanie patrz „Stahl u. Eisen“ 1926, str. 476, także [12].
- [22] С. Н. Петров, *Работа и давление при прокатке*. Записки Горного Института, 1917, вып. II; także [34].
- [23] F. Riedel, *Das Berechnen der Breitung beim Walzen*, „Stahl u. Eisen“, 1936, str. 1551; także [13].
- [24] E. M. Scheld, *Das Breiten beim Walzen*, „Stahl u. Eisen“, 1910, str. 415.
- [25] E. Siebel, *Formänderungswiderstand und Werkstofffluss beim Walzen*, „Stahl u. Eisen“, 1930, str. 1769.
- [26] E. Siebel, *Über das Breiten beim Walzen*, „Stahl u. Eisen“, 1937, str. 413.
- [27] A. Spenle, *Das Breiten beim Walzen bei verschiedenen Walzgeschwindigkeit und Stahlzusammensetzung*, „Stahl u. Eisen“, 1936, str. 544.
- [28] W. Tafel i E. Schneider, *Das Greifen von Walzen bei veränderlichen Walzgeschwindigkeit*, „Stahl u. Eisen“, 1924, str. 305.
- [29] W. Tafel i H. Sedlaczek, *Das Breiten beim Walzen*, „Stahl u. Eisen“, 1925, str. 190; także [14].
- [30] W. Tafel i G. Pajunk, *Ermittelung des Breitungsverlaufes in den wagerechten Schichten von Walzkörpern*, „Stahl u. Eisen“, 1927, str. 1562; także [12].
- [31] W. Tafel i W. Knoll, *Die Klärung der Breitungsfrage beim Walzen mit Hilfe der Spannungsfächenhypothese*, „Metallwirtschaft“, 1931, str. 799; streszczenie patrz [13].

- [32] И. Я. Тарновский, *Уширение при прокатке в гладких валках. Обработка металлов давлением* (сборник статей). Металлургиздат, 1952; omówienie pracy patrz [8].
- [33] И. Я. Тарновский, *Формоизменение при пластической обработке металлов*, Металлургиздат 1954.
- [34] А. П. Виноградов и Г. А. Виноградов, *Калибровка прокатных валков*, Металлургиздат, 1950.
- [35] М. В. Вращкий, *Наполнение прямоугольных и ромбических калибров при прокатке некоторых легированных сталей*, „Сталь“ 1940, nr 3; także [14].
- [36] Z. Wusatowski, *Gniot, wydłużenie i roztlóczenie w procesie walcowania*, dysertacja doktorska, Gliwice 1947 (maszynopis).
- [37] Z. Wusatowski, *Gniot, roztlóczenie i wydłużenie w procesie walcowania na gorąco*, prace GIMO, 1949, str. 27.
- [38] Z. Wusatowski i R. Wusatowski, *Wpływ szybkości, temperatury i rodzaju walców na roztlóczenie i wydłużenie w procesie walcowania na gorąco*, prace GIMO, 1950, str. 111.
- [39] Z. Wusatowski i A. Wojtylak, *Пłynięcie метали, wydłużanie i roztlóczanie przy walcowaniu kształtowników regularnych*, prace GIMet, 1951, str. 23.
- [40] Z. Wusatowski i E. Szostak, *Ustalenie poprawek do obliczenia wydłużenia i roztlóczenia przy walcowaniu stali stopowych na gorąco*, prace IMH, 1954, str. 217.
- [41] М. Я. Золотников, *Уширение меди в связи с прокаткой плоских подкатов из вайербарсов*, „Металлург“ 1934, nr 6, także [13].