

MECHANIKA z. 12



P. 3361/62

STANISŁAW KONCEWICZ

PRĘDKOŚĆ ODKSZTAŁCENIA WZGLĘDNEGO W PROCESIE WALCOWANIA

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYT NAUKOWY Nr 62 – GLIWICE 1962

SPIS TREŚCI

	str.
1. Wprowadzenie	3
2. Wykaz stosowanych oznaczeń.	4
3. Krytyczna ocena dotychczasowych wzorów do określania średniej prędkości gniotu w procesie walcowania	6
4. Składowe prędkości odkształcenia względnego	10
5. Podstawowe założenia przy obliczaniu prędkości przepływu i prędkości gniotu w szczelinie walców	13
6. Prędkość przepływu metalu przez szczelinę walców	14
7. Wyprowadzenie wzorów do obliczania chwilowej i średniej prędkości gniotu z uwzględnieniem poszerzenia	17
8. Dyskusja wyprowadzonych wzorów do obliczania średniej prędkości gniotu	25
9. Opracowanie metody pomiaru średniej prędkości gniotu i zastosowanej do niej aparatury oraz sposób prowadzenia pomiarów.	28
10. Próby i wyniki pomiarów	31
11. Analiza możliwego błędu pomiarów	33
12. Porównanie wyników przeliczeń przy pomocy omówionych wzorów dotychczasowych i wzoru autora z wynikami pomiarów	34
13. Wnioski	37
14. Literatura	38

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 62

P.3361/62

STANISŁAW KONCEWICZ



**PRĘDKOŚĆ ODKSZTAŁCENIA WZGLĘDNEGO
W PROCESIE WALCOWANIA**

PRACA HABILITACYJNA Nr 19

Data otwarcia przewodu habilitacyjnego 4. IV. 1962 r.

GLIWICE 1962

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Andrzej Grossman

Recenzenci:

Prof. dr inż. ZYGMUNT WUSATOWSKI — Politechnika Śląska

Prof. dr inż. TADEUSZ PEŁCZYŃSKI — Politechnika Warszawska

Prof. dr inż. FELIKS TYCHOWSKI — Politechnika Poznańska

Dział Nauki — Sekcja Wydawnictw Naukowych — Politechniki Śląskiej

Oddano do wyk. 11. VI. 1962	Zam. 928	G-21	Ark. druk. 2,5	Ark. wyd. 2 ³ / ₁₆
Papier offsetowy kl. V, 70x100, 70 g			Nakład 300+55	Cena zł 2,90

Zakład Produkcji Pomocy Naukowych Politechniki Śląskiej w Gliwicach

1. WPROWADZENIE

Powszechnie przyjmuje się dziś, że jednym z czynników wpływających w sposób istotny na wielkość oporu plastycznego przy odkształcaniu metali na gorąco jest prędkość odkształcenia względnego [1 - 11, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 25]. Jest więc rzeczą konieczną właściwie określać prędkości odkształcenia względnego dla zasadniczych przebiegów technologicznych przeróbki plastycznej.

W niektórych przypadkach prędkość odkształcenia względnego zmienia się wzdłuż strefy odkształcenia. Najwygodniej jest wtedy przyjąć dla rozważanego obszaru średnią wartość prędkości odkształcenia względnego.

Jednym z wspomnianych przypadków przeróbki plastycznej jest proces walcowania na gorąco. W literaturze technicznej znanych jest szereg wzorów do obliczania średniej prędkości odkształcenia względnego przy walcowaniu (zwanej dalej średnią prędkością gniotu), z których na szczególną uwagę zasługują wzory Ekelunda [1], Triksa [12], Orwana [13], Krejndli-
na [14], Larke'a [15], [16], Celikowa [17], Korolewa [18], Cooka [5], [20], Musatowskiego [19] i Mierenkowa [25]. Żaden z wyliczonych wzorów nie uwzględnia jednak wpływu poszerzania pasma w czasie przepustu, którego nie można pominąć nawet przy walcowaniu na zimno. Brak również dotychczas metod pomiarowych, zezwalających na eksperymentalne potwierdzenie prawdziwości przytoczonych wzorów.

Próbie częściowego wypełnienia tych luk stanowi niniejsza praca.

2. WYKAZ STOSOWANYCH OZNACZEŃ

- h_1, h_2, h_x - wysokość walcowanego pasma przed i po przepuście oraz w dowolnym przekroju szczeliny walców,
- b_1, b_2, b_x - szerokość walcowanego pasma przed i po przepuście oraz w dowolnym przekroju szczeliny walców,
- F_1, F_2, F_x - powierzchnia przekroju walcowanego pasma przed i po przepuście oraz w dowolnym przekroju szczeliny walców,
- $\Delta h = h_1 - h_2$ - gniot bezwzględny,
- $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_1}$ - gniot względny,
- $\dot{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}_x$ - chwilowa prędkość odkształcenia, prędkość gniotu w dowolnym przekroju szczeliny walców,
- $\bar{\varepsilon}$ - średnia prędkość gniotu,
- D - czynna średnica walców,
- R - połowa czynnej średnicy walca,
- v_1, v_2, v_x - prędkość przepływu metalu przez przekrój wejściowy, wyjściowy i dowolny w szczelinie walców,
- v_w - prędkość obwodowa walców,
- n - liczba obrotów walców w minucie,
- α - kąt chwytu,
- φ - dowolny kąt odpowiadający przekrojowi F_x ,
- φ_m - kąt, przy którym funkcja \dot{S}_x osiąga swą maksymalną wartość,

- δ - kąt płaszczyzny podziałowej,
 $l_d = R \sin \alpha \sqrt{RAh}$ - długość szczeliny walców,
 s - współczynnik wyprzedzania,
 γ - współczynnik gniotu,
 λ - współczynnik wydłużenia,
 β - współczynnik poszerzenia,
 k - wykładnik potęgowy Wydrina,
 t - czas przejścia określonego przekroju, przez szczelinę walców.

3. KRYTYCZNA OCENA DOTYCHCZASOWYCH WZORÓW DO OKREŚLANIA ŚREDNIEJ PRĘDKOŚCI GNIOU W PROCESIE WALCOWANIA

Wprowadzając pojęcie czynnika, ujmującego wpływ prędkości walcowania na opór plastyczny, a zwanego obecnie średnią prędkością gniotu, Ekelund [1] podał następujące wyrażenie:

$$\dot{\epsilon} = \frac{2 v_w}{h_1 + h_2} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (1)$$

które znalazło szerokie zastosowanie praktyczne. Wyrażenie (1) podane przez Ekelunda wynika z intuicyjnego przyjęcia, że średnia prędkość gniotu jest równa stosunkowi pionowej składowej prędkości obwodowej walców w połowie długości szczeliny walców do średniej wysokości walcowanego pasma.

Trinks [12] uważał, że pionowa składowa prędkości obwodowej walca, określona zgodnie z założeniem Ekelunda odpowiada średniej wartości tych składowych wzdłuż łuku styku metalu z walcami i nie ma już potrzeby wprowadzania średniej wysokości pasma. W związku z tym zaproponował wzór:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v'_w}{h_1} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (2)$$

Orowan [13] zaleca obliczanie średniej prędkości gniotu z wzoru:

$$\dot{\epsilon} = \frac{n}{\sqrt{\frac{h_2}{D}}} \frac{2\pi}{60} (1 - 0,75 \epsilon) \sqrt{\frac{\epsilon}{2(1-\epsilon)}} \quad (3)$$

który po prostych przekształceniach można sprowadzić do postaci dogodnej dla porównania go z poprzednimi wzorami:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w}{h_2} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} (1 - 0,75\epsilon) \quad (4)$$

Krejndlin [14] wyprowadził następujący wzór do obliczania średniej prędkości gniotu, zakładając poślizg metalu względem walców w całym obszarze szczeliny walców przy stałej szerokości walcowanego pasma:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w}{\alpha} \frac{2 h_2}{(h_2 + D)^2} \left[(h_2 + D) \frac{\Delta h}{h_1 \cdot h_2} + \ln \frac{h_1}{h_2 \cos \alpha} \right] s \quad (5)$$

Przyjmując przybliżoną zależność $\alpha \approx \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$, wzór ten można również sprowadzić do postaci zawierającej niektóre elementy pozostałych wzorów:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \frac{D}{D + h_2} s \left[\frac{\Delta h}{h_1} + \frac{h_2}{h_2 + D} \ln \frac{h_1}{h_2 \cos \alpha} \right] \quad (6)$$

Larke [15], [16] stwierdza, że należy odróżnić dwa skrajne przypadki walcowania: w pierwszym przypadku metal ślizga się po walcach w całym obszarze szczeliny walców (z wyjątkiem płaszczyzny podziałkowej), w drugim metal może w całym obszarze szczeliny walców przywierać do walców.

W przypadku poślizgu

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w \cdot h_s \cos \delta}{h_1 \cdot h_2} \sqrt{\frac{2(h_1 - h_2)}{D}} \quad (7)$$

co po odpowiednim przekształceniu i przyjęciu za $\frac{h_s \cos \delta}{h_2} = s$ można sprowadzić do postaci

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w}{h_1} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} s \quad (8)$$

W przypadku przywierania

$$\dot{\varepsilon} = v_w \sqrt{\frac{2}{D(h_1 - h_2)}} \ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (9)$$

Celikow [17] zakłada, że w całym obszarze szczeliny walców występuje poślizg i na tej podstawie wyprowadza wzór, który podaje w postaci:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_2}{l_d} \frac{\Delta h}{h_1} \quad (10)$$

zaznaczając, że jeśli uda się wyliczyć szybkość wyjścia metalu z walców v_2 , z uwzględnieniem przywierania, wzór (10) będzie ważny również dla tego przypadku. Wprowadzając zależność $v_2 = s \cdot v_w$ oraz przyjmując przybliżoną wartość $l_d \approx \sqrt{R \Delta h}$, wzór Celikowa można sprowadzić do postaci

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_w}{h_1} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \cdot s \quad (8)$$

podanej przez Larke'a.

Korolew [18] założył, że na całej długości łuku styku metal przywiera do walców i na tej podstawie wyprowadził następujący wzór, ważny przy stałej szerokości walcowanego pasma:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_w}{l_d} \ln \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (11)$$

który po przyjęciu $l_d \approx \sqrt{R \Delta h}$ i odpowiednim przekształceniu można napisać w postaci

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \ln \frac{h_1}{h_2}, \quad (9)$$

podanej przez Larke'a.

Również Cook [5], [20] podaje wzór

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2\pi n}{60} \sqrt{\frac{R}{h_2}} \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} \ln \frac{1}{1-\varepsilon}, \quad (12)$$

który po odpowiednich przekształceniach można sprowadzić do postaci (9), podanej przez Larke'a.

Wusatowski [13], [19], [22] rozważa - podobnie jak Larke - dwa skrajne przypadki walcowania, podając dla obu przypadków oddzielne wzory.

W przypadku przywierania

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_w \sin \alpha}{h_1} \quad (13)$$

Przyjmując przybliżoną wartość $\sin \alpha \approx \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$, wzór ten można sprowadzić do postaci (2) podanej przez Trinksa. W przypadku poślizgu

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{h_1} \quad (14)$$

lub po uwzględnieniu zależności: $v_2 = v_w \cdot s$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_w}{h_1} s \operatorname{tg} \alpha \quad (15)$$

Podobne rozważania dla dwóch przypadków walcowania przeprowadza Mierenkow [25] i dla przypadku przywierania podaje następujący wzór:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_w}{D l_d} \left[(h_2 + D) \ln \frac{h_1}{h_2} - \Delta h \right], \quad (16)$$

który można sprowadzić do postaci dogodnej dla porównania go z pozostałymi wzorami

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \left[\frac{h_2 + D}{D} \ln \frac{h_1}{h_2} - \frac{\Delta h}{D} \right] \quad (17)$$

Dla przypadku poślizgu Mierenkow zaleca wzór:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w \cdot h_f \cos \delta \cdot \Delta h}{l_d h_1 h_2}, \quad (18)$$

który, łatwo można sprowadzić do odpowiedniego (7) wzoru Larke'a.

Wszystkie przytoczone wzory ustalono przy założeniu, że szerokość pasna w szczelinie walców pozostaje stała, co zachodzi jedynie przy walcowaniu w wykrojach zamkniętych. Przyjęcie skrajnego przypadku walcowania z poślizgiem lub przywieraniem na całej długości szczeliny walców również znacznie odbiega od rzeczywistych warunków walcowania. W szczególności przyjęcie przywierania metalu do walców jest równoznaczne z założeniem, że wydłużenie w każdym przeświecie jest równe $\lambda = \frac{1}{\cos \alpha}$, co oczywiście zdarza się niezwykle rzadko. Pośrednie przypadki walcowania (przy istnieniu strefy poślizgu i strefy przywierania) mogą uwzględniać jedynie wzory Krejndlina, Larke i Musatowskiego, jeżeli wchodzący w skład tych wzorów współczynnik wyprzedzania s zostanie wyznaczony przy uwzględnieniu przywierania na pewnej części łuku styku. Dodatkowe uproszczenia wprowadzone przez poszczególnych autorów spowodowały znaczne różnice pomiędzy poszczególnymi wzorami.

Przytoczone wzory oraz wzory zaproponowane w p.7 przez autora zestawiono w tabl.1.

4. SKŁADOWE PRĘDKOŚCI ODKSZTAŁCENIA WZGLĘDNEGO

Określoną chwilową prędkość odkształcenia względnego można rozłożyć na trzy wzajemnie prostopadłe kierunki, na przykład zgodne z kierunkami wysokości, szerokości i długo-

ści walcowanego pasma. W takim przypadku można mówić o prędkości gniotu, poszerzenia i wydłużenia.

Zgodnie z definicją prędkości odkształcenia względnego można napisać:

$$\dot{\epsilon}_h = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt}; \quad \dot{\epsilon}_b = \frac{1}{b} \frac{db}{dt}; \quad \dot{\epsilon}_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} \quad (19)$$

lub

$$\dot{\epsilon}_h = \frac{v_h}{h}; \quad \dot{\epsilon}_b = \frac{v_b}{b}; \quad \dot{\epsilon}_l = \frac{v_l}{l} \quad (20)$$

po czym przez v_h , v_b i v_l oznaczono składowe prędkości odkształcania w kierunkach wysokości h , szerokości b i długości l .

Przyjmując na podstawie prawa stałej objętości

$$v_h \cdot F_h + v_b \cdot F_b + v_l \cdot F_l = 0$$

oraz $F_h = \frac{V}{h}$, $F_b = \frac{V}{b}$ i $F_l = \frac{V}{l}$ można napisać

$$\frac{v_h}{h} + \frac{v_b}{b} + \frac{v_l}{l} = 0 \quad (21)$$

lub

$$\dot{\epsilon}_h + \dot{\epsilon}_b + \dot{\epsilon}_l = 0 \quad (22)$$

Wynika stąd, że algebraiczna suma składowych prędkości odkształcenia względnego w trzech głównych kierunkach odkształcania jest równa zero.

Ponieważ w procesie walcowania zawsze występuje zmniejszenie wysokości i zwiększenie szerokości i długości walcowanego pasma, można przyjąć, że maksymalną prędkością odkształcenia względnego jest prędkość gniotu

$$|\dot{\epsilon}_h| = |\dot{\epsilon}_b| + |\dot{\epsilon}_l| \quad (23)$$

Jak już wspomniano, w obliczeniach walcowniczych wygodniej jest posługiwać się wartościami średnich prędkości odkształcenia względnego, które w ogólnym przypadku można obliczyć z zależności

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{1}{t} \int_0^t \dot{\epsilon} dt \quad (24)$$

Po uwzględnieniu zależności (19) i scałkowaniu otrzymanych wyrażeń w odpowiednich granicach można napisać

$$\dot{\bar{\epsilon}}_h = \frac{1}{t} \ln \frac{h_2}{h_1}; \quad \dot{\bar{\epsilon}}_b = \frac{1}{t} \ln \frac{b_2}{b_1}; \quad \dot{\bar{\epsilon}}_l = \frac{1}{t} \ln \frac{l_2}{l_1} \quad (25)$$

przy czym $\dot{\bar{\epsilon}}_h$, $\dot{\bar{\epsilon}}_b$ i $\dot{\bar{\epsilon}}_l$ są średnimi wartościami składowych prędkości odkształcenia względnego w odpowiednich kierunkach. Łatwo wykazać, że wartości te są jednocześnie składowymi średniej prędkości odkształcenia w rozważanym przedziale.

Ponieważ odkształcenia składowe zmieniają się w tym samym czasie, łatwo wykazać, że

$$\dot{\bar{\epsilon}}_h + \dot{\bar{\epsilon}}_b + \dot{\bar{\epsilon}}_l = 0 \quad (26)$$

to jest, że algebraiczna suma składowych średniej prędkości odkształcenia względnego w trzech głównych kierunkach odkształcenia jest równa zero.

Na podstawie zależności (26) można napisać

$$\left| \dot{\bar{\epsilon}}_h \right| = \left| \dot{\bar{\epsilon}}_b \right| + \left| \dot{\bar{\epsilon}}_l \right| \quad (27)$$

przy czym

$$\left| \dot{\bar{\epsilon}}_h \right| = \frac{1}{t} \left| \ln \frac{h_1}{h_2} \right| \quad (28)$$

można przyjąć za maksymalną wartość średniej prędkości odkształcenia względnego. Prędkość tę nazwano w dalszej części średnią prędkością gniotu.

5. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA PRZY OBLICZANIU PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU I PRĘDKOŚCI GNIOTU W SZCZELINIE WALCÓW

Dalsze rozważania nad rozkładem prędkości przepływu metalu przez szczelinę walców oraz nad rozkładem prędkości gniotu w szczelinie walców oparto o następujące założenia podstawowe:

- a) przekroje płaskie pozostają w czasie odkształcania płaskimi,
- b) odkształcenie metalu nie zależy od współrzędnych w kierunku wysokości i szerokości rozważanego przekroju,
- c) obydwie walce są cylindryczne, posiadają jednakowe średnice i jednakową prędkość kątową,
- d) osie obu walców są wzajemnie równoległe.

Założenie pierwsze najbardziej odbiega od rzeczywistych warunków odkształcania w procesie walcowania; jest ono jednak powszechnie przyjmowane przy rozwiązywaniu zagadnień przeróbki plastycznej. Założenie to wyklucza możliwość przywierania metalu do walców na obszarze większym niż obszar materialnej linii, wyznaczającej wielkość kąta płaszczyzny podziałowej, jeżeli wydłużenie w czasie przepustu jest większe

niż $\lambda_g = \frac{1}{\cos \alpha}$. W praktycznych przypadkach walcowania wydłużenie jest zawsze większe od granicznego $\lambda_g = \frac{1}{\cos \alpha}$.

Pomimo tego obszar przywierania metalu do walców posiada zazwyczaj wymiary skończone. Powoduje to większe lub mniejsze zniekształcenie przekrojów płaskich, co oczywiście związane jest z nierównomiernym rozkładem odkształceń i prędkości przepływu metalu przez poszczególne przekroje szczeliny walców.

W ustalonym procesie walcowania (z wyjątkiem pewnych niewielkich, początkowych i końcowych odcinków walcowanego pasma) różnice prędkości przepływu przez poszczególne obszary przekroju szczeliny walców są jednak stosunkowo niewielkie.

W związku z tym przyjęcie prędkości średniej, jednakowej dla całego rozważanego przekroju, nie wprowadza większego błędu.

Praktyczne zadośćuczynienie pozostałym założeniom nie następuje większych trudności w normalnych warunkach walcowania.

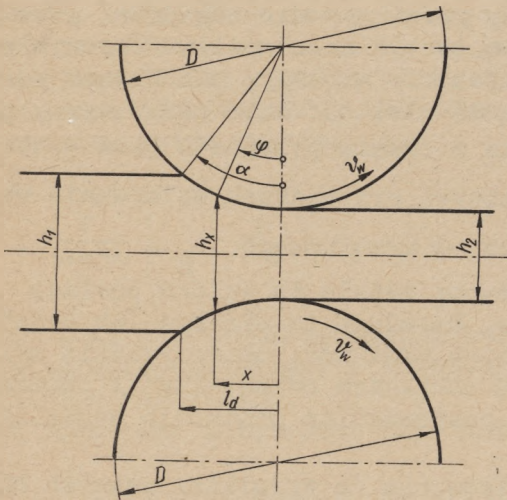
6. PRĘDKOŚĆ PRZEPŁYWU METALU PRZEZ SZCZELINĘ WALCÓW

Zgodnie z przyjętymi założeniami średnią prędkość przepływu metalu przez poszczególne przekroje szczeliny walców można wyznaczyć na podstawie zasady stałej objętości. Przyjmując oznaczenia zgodne z rys.1 można napisać

$$F_1 \cdot v_1 = F_x \cdot v_x = F_\delta \cdot v_\delta = F_2 \cdot v_2 \quad (29)$$

stąd

$$v_x = \frac{F_2}{F_x} v_2 = \frac{F_2}{F_1} v_2 \frac{F_1}{F_x} = \frac{\lambda_x}{\lambda} v_2 \quad (30)$$



Rys.1.. Oznaczenie głównych parametrów w szczelinie walców

Wydłużenie odniesione do dowolnego przekroju w odległości $0 \leq x \leq l$ od płaszczyzny wyjścia metalu z walców można obliczyć z zależności podanych przez Wusatowskiego [22] lub Wydrina [23]

$$\lambda_x = \lambda_1^{k-1} \quad (31)$$

przy czym

$$\lambda_x = \frac{h_x}{h_1} \quad (32)$$

oraz

$$k = \frac{\ln \beta}{\ln 1/\gamma} \quad (33)$$

Po uwzględnieniu tych zależności wzór (30) można przedstawić następująco:

$$v_x = \frac{v_2}{\lambda} \lambda_x^{k-1} = v_2 \left(\frac{\lambda_x}{\lambda} \right)^{k-1} \quad (34)$$

Po uproszczeniu

$$v_x = v_2 \left(\frac{h}{h_2} \right)^{k-1} \quad (35)$$

Ponieważ $h = h_2 + D(1 - \cos\varphi)$, wyrażenie (35) można uprościć do postaci

$$v_x = v_2 \left[1 + \frac{D}{h_2} (1 - \cos\varphi) \right]^{k-1} \quad (36)$$

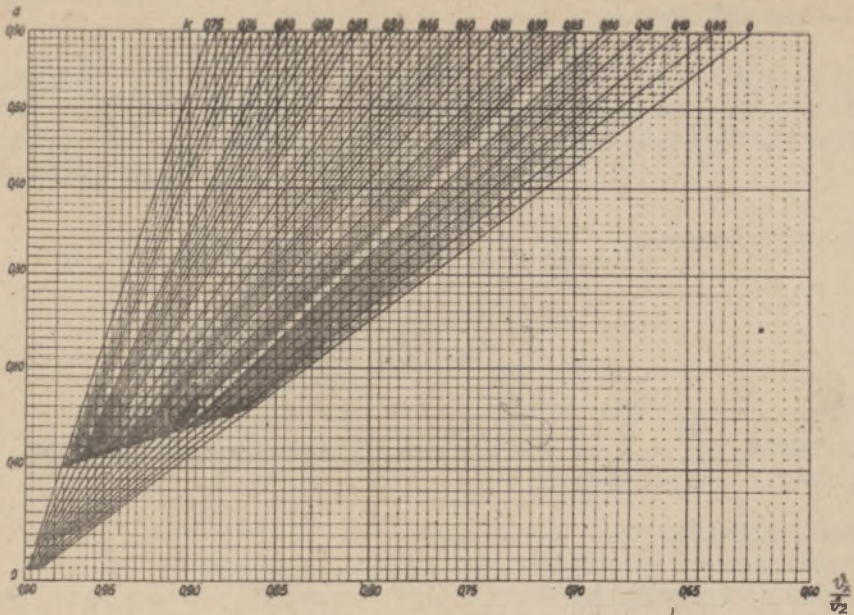
nadającej się do przedstawienia go w formie nomogramu. Nomogram taki dla dwóch zakresów danych podstawowych przedstawiono na rys. 2 i 3. Znalezienie stosunku $\frac{v_x}{v_2}$ przy znanych wartościach k i $a = \frac{D}{h_2} (1 - \cos\varphi)$ nie przedstawia żadnych trudności.

Prędkość v_2 można ustalić drogą bezpośredniego pomiaru lub obliczyć z zależności

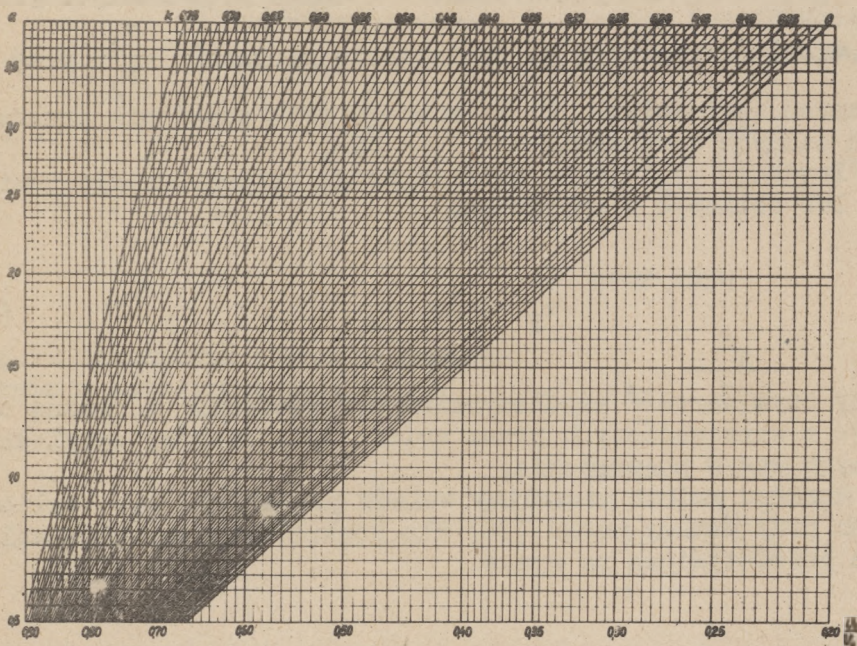
$$v_2 = s \cdot v_w \quad (37)$$

przy czym wartość współczynnika wyprzedzania s można obliczyć z wyprowadzonych przez autora [24] wzorów, uwzględniających wpływ poszerzenia.

Rozkład wzdłuż szczeliny walców prędkości v_x wyliczonych przy pomocy wzoru (36) dla konkretnych warunków walcowania przedstawiono na rys.4.

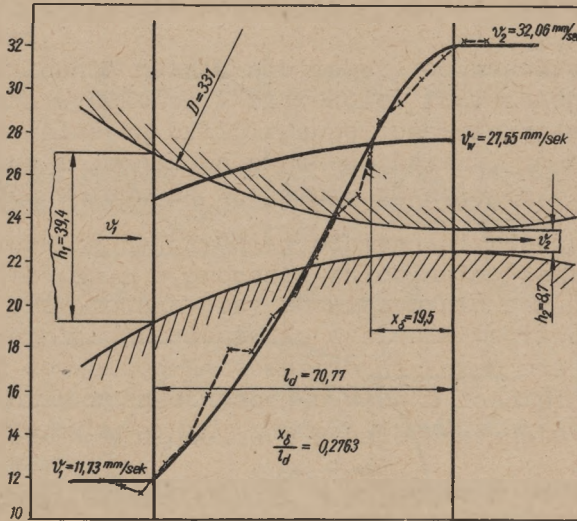


Rys.2. Nomogram do obliczania prędkości przepływu metalu przez dowolny przekrój szczeliny walców [cz.I]



Rys.3. Nomogram do obliczania prędkości przepływu metalu przez dowolny przekrój szczeliny walców [cz.II]

Na rysunku tym uwidoczniiono również poziomą składową prędkości obwodowej walców w funkcji odległości x od płaszczyzny wyjścia metalu z walców. Punkt przecięcia się tej krzywej z krzywą odpowiadającą prędkości przepływu metalu przez szczelinę walców określa położenie kąta płaszczyzny podziałkowej δ .



Rys.4. Rozkład prędkości metalu v w szczelinie walców ustalony drogą pomiaru i obliczony x wzoru (36) przy walcowaniu $\phi 40$ w temperaturze 1000°C - próbka nr 261B - $\gamma = 0,2148$

7. WYPROWADZENIE WZORÓW DO OBLICZANIA CHWILOWEJ I ŚREDNIEJ PRĘDKOŚCI GNIOTU Z UWZGLĘDNIENIEM POSZERZENIA

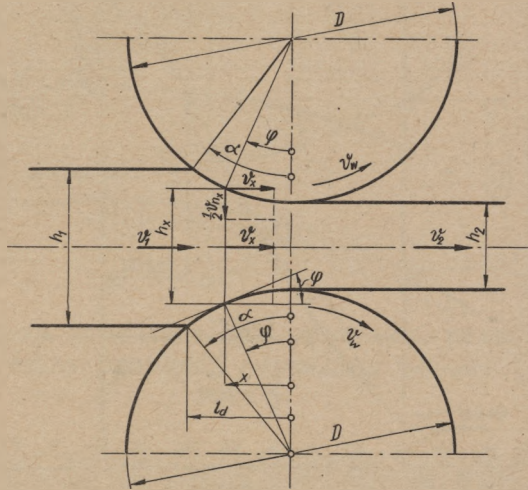
W oparciu o przytoczone w p.5 podstawowe założenia można w dowolnym przekroju szczeliny walców (odległym o x od płaszczyzny wyjścia metalu z walców) określić chwilową prędkość gniotu zgodnie z zależnością (19)

$$\dot{\epsilon}_x = \left| \frac{v_{hx}}{h_x} \right| \quad (38)$$

gdzie v_{hx} jest prędkością zmiany wysokości przekroju h_x (w dalszych wywodach pominięto znak bezwzględnej wartości).

Przyjmując oznaczenia zgodne z rys.5, wielkość v_{hx} można określić z zależności

$$v_{hx} = 2 v_x \operatorname{tg} \varphi \quad (39)$$



Rys.5. Schemat rozkładu prędkości w szczelinie walców

Mając na uwadze, że $h_x = h_2 + \frac{D}{h_2}(1 - \cos \varphi)$ oraz uwzględniając zależności (36) i (39) można napisać

$$\dot{\epsilon}_x = 2 v_2 \frac{\left[1 + \frac{D}{h_2} (1 - \cos \varphi) \right]^{k-1}}{h_2 + D (1 - \cos \varphi)} \operatorname{tg} \varphi \quad (40)$$

lub po odpowiednim przekształceniu

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{2 v_2}{h_2} \left[1 + \frac{D}{h_2} (1 - \cos \varphi) \right]^{k-2} \operatorname{tg} \varphi \quad (41)$$

Wzór (41) zezwala na obliczenie chwilowej prędkości gniotu dla dowolnego przekroju szczeliny walców. Prędkość ta zmienia się wraz z przemieszczeniem rozważanego przekroju wzdłuż szczeliny walców. Wpływ poszerzenia na chwilową prędkość gniotu uwzględnia współczynnik k , wyliczony zgodnie z wzorem (33).

Można wykazać, że funkcja $\dot{\epsilon}_x = f(\varphi) = f_1(x)$ posiada maksimum przy kącie φ_m określonym następującym równaniem

$$\cos^3 \varphi_m - \frac{k-3}{k-2} \cos \varphi_m - \frac{1}{k-2} \frac{D+h_2}{D} = 0 \quad (42)$$

przy czym za realne wartości kąta φ_m należy przyjąć takie kąty, które spełniają dodatkowy warunek

$$0 < \varphi_m \leq \alpha \quad (43)$$

Jeżeli wyliczony z wzoru (42) kąt φ_m jest większy od kąta chwytu, funkcja $\dot{\epsilon}_x(\varphi)$ jest w przedziale $0 \leq \varphi < \alpha$ funkcją stale rosnącą.

Przebieg funkcji $\dot{\epsilon}_x(x)$ w zależności od stosunku $\frac{x}{R \sin \alpha}$ dla walcowania z różnymi gniotami prętów o przekroju 40 x 40 mm, przedstawiono na rys.6. Linią przerywaną połączono maksymalne wartości funkcji $\dot{\epsilon}_x(x)$ występujące przy różnych gniotach.

Uwzględnienie zmian chwilowej prędkości gniotu w obliczeniach nacisków na walce jest niezmiernie utrudnione. Z tego powodu w praktycznych obliczeniach nacisku na walce stosuje się średnią wartość prędkości gniotu.

Średnią prędkość gniotu przy walcowaniu można by obliczyć z wzoru (28)

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \frac{1}{t} \ln \frac{h_1}{h_2}, \quad (44)$$

jeżeli byłby znany czas przejścia rozważanego przekroju przez szczelinę walców.

Teoretycznie można obliczyć czas przejścia określonego przekroju przez szczelinę walców, wychodząc z zależności (36).

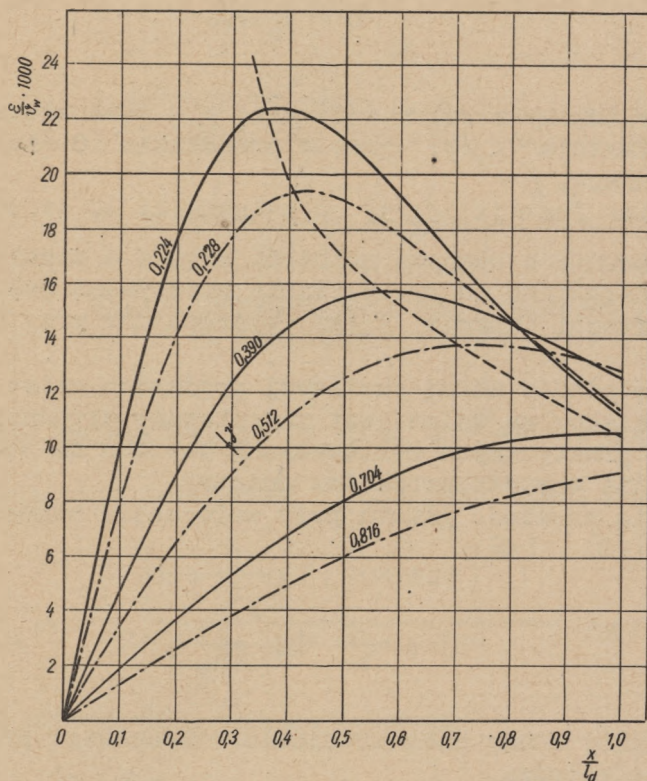
$$v_x = \frac{dx}{dt} = v_2 \left[1 + \frac{D}{h_2} (1 - \cos\varphi) \right]^{k-1} \quad (45)$$

na podstawie której można napisać

$$dt = \frac{1}{v_2} \left[1 + \frac{D}{h_2} (1 - \cos\varphi) \right]^{1-k} dx \quad (46)$$

Przyjmując zgodnie z rys.5

$$x = R \sin\varphi \quad (47)$$



Rys.6. Zmiana chwilowych prędkości gniotu wzdłuż szczeliny walców

oraz

$$dx = R \cos \varphi \, d\varphi$$

równanie (46) można napisać w postaci

$$dt = \frac{R}{v_2} \left[1 + \frac{D}{h_2} (1 - \cos \varphi) \right]^{1-k} \cos \varphi \, d\varphi \quad (48)$$

Całka równania (48) nie da się rozwiązać w funkcjach elementarnych. Rozwinięcie funkcji podcałkowej w szereg prowadzi do skomplikowanego wyrażenia przy jednoczesnej konieczności zrezygnowania z rozwiązania ścisłego.

Czas przejścia określonego przekroju przez szczelinę walców można obliczyć z pewnym przybliżeniem, zakładając prostoliniowy przebieg zmiany prędkości przepływu metalu w szczelinie walców (rys.4) zamiast przebiegu określonego równaniem (36). W takim przypadku

$$t = \frac{l_d}{v_{sr}} = \frac{2 l_d}{v_1 + v_2} \quad (49)$$

Ponieważ $v_1 = \frac{v_2}{\lambda}$, zatem

$$t = \frac{2 l_d}{v_2} \frac{1}{1/\lambda + 1} = \frac{2 l_d}{v_2} \frac{\lambda}{\lambda + 1} \quad (50)$$

Biorąc dodatkowo pod uwagę zależność $v_2 = v_w \cdot s$, równanie (44) można napisać w postaci:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_w}{l_d} \frac{s}{2} \frac{\lambda + 1}{\lambda} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (51)$$

lub

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_w}{l_d} \frac{s}{2} (1 + \beta \cdot \gamma) \ln 1/\gamma \quad (52)$$

Wzór ten można jeszcze sprowadzić do postaci ułatwiającej jego porównanie z dotychczas znanymi wzorami:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \ln \frac{h_1}{h_2} \frac{s}{2} \frac{\lambda+1}{\lambda} \quad (53)$$

Należy jednak pamiętać, że wyprowadzono go przy upraszczającym założeniu prostoliniowej zmiany szybkości przepływu metalu przez szczelinę walców.

Średnią prędkość gniotu można obliczyć bez wprowadzenia dodatkowych założeń upraszczających, mianowicie jako wartość średnią chwilowych prędkości gniotu w przedziale $0 \leq x \leq l_d$. Na tej podstawie można napisać:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{1}{R \sin \alpha} \int_0^{l_d} \dot{\epsilon}_x dx \quad (54)$$

przy czym $\dot{\epsilon}_x$ określono zgodnie z wzorem (41). Za dx podstawiono wyrażenie (47). Uwzględniając te zależności można po zmianie granic napisać:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{1}{R \sin \alpha} \frac{2 v_2}{h_2} \int_0^{\alpha} \left[1 + \frac{D}{h_2} (1 - \cos \varphi) \right]^{k-2} \operatorname{tg} \varphi \cdot R \cos \varphi d\varphi \quad (55)$$

Po odpowiednich przekształceniach wzór ten przyjmie postać:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{2 v_2}{h_2 \sin \alpha} \int_0^{\alpha} \left[1 + \frac{D}{h_2} (1 - \cos \varphi) \right]^{k-2} \sin \varphi d\varphi \quad (56)$$

Po scałkowaniu i podstawieniu granic

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{v_2}{R \sin \alpha} \frac{1}{k-1} \left\{ \left[1 + \frac{D}{h_2} (1 - \cos \alpha) \right]^{k-1} - 1 \right\} \quad (57)$$

Po uproszczeniu i uwzględnieniu zależności

$$\left[1 + \frac{D}{h_2} (1 - \cos\alpha)\right]^{k-1} = \left[\frac{h_2 + D(1 - \cos\alpha)}{h_2}\right]^{k-1} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{k-1} = \frac{1}{\lambda} \quad (58)$$

wzór (57) przyjmie ostateczną postać

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_2}{R \sin\alpha} \left| \frac{\lambda - 1}{k - 1} \right| \frac{1}{\lambda} \quad (59)$$

lub

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w}{R \sin\alpha} \frac{\lambda - 1}{\lambda} \frac{s}{1 - k} \quad (60)$$

Wzór (60) jest końcowym wzorem do obliczania średniej prędkości gniotu. Poszerzenie pasma w czasie przepustu uwzględnione jest w wielkościach k , λ i s [24]. Wielkość λ można obliczyć ze stosunku przekrojów walcowanego pasma przed i po przepuszczeniu.

Dla małych kątów chwytu wzór (60) można sprowadzić do postaci, umożliwiającej bezpośrednie porównanie go z dotychczasowymi wzorami, omówionymi w punkcie 3, przyjmując przybliżoną zależność $l_d = R \sin\alpha \approx \sqrt{R \Delta h}$:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \frac{s}{1 - k} \frac{\lambda - 1}{\lambda} \quad (61)$$

(pominięto tu oczywiście znaki bezwzględnych wartości).

Dla ułatwienia tego porównania, wzór (61) umieszczono w tabl.1 wspólnie z pozostałymi.

Zestawienie wzorów do obliczania średniej prędkości gniotu przy walcowaniu

Lp.	Autorzy (wykaz chronologiczny)	Nr wzoru	Wzór: $\bar{v} =$
1	Ekelund	1	$\frac{2 v_w}{h_1+h_2} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$
2	Trinks Wusatowski I	2	$\frac{v_w}{h_1} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$
3	Orowan	4	$\frac{v_w}{h_2} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} (1 - 0,75\varepsilon)$
4	Krejndlin	6	$\frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \frac{D}{D+h_2} s \left[\frac{\Delta h}{h_1} + \right.$ $\left. + \frac{h_2}{h_2+D} \ln \frac{h_1}{h_2 \cos \alpha} \right]$
5	Larke I Celikow Mierenkow I	8	$\frac{v_w}{h_1} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} s$
6	Larke II Korolew Cook	9	$\frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \ln \frac{h_1}{h_2}$
7	Wusatowski II	15	$\frac{v_w}{h_1} \operatorname{tg} \alpha s$
8	Mierenkow II	17	$\frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \left[\frac{h_2+D}{D} \ln \frac{h_1}{h_2} - \frac{\Delta h}{D} \right]$
9	Koncewicz I	53	$\frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \ln \frac{h_1}{h_2} \frac{s}{2} \frac{\lambda+1}{\lambda}$
10	Koncewicz II	61	$\frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \cdot \frac{\lambda-1}{\lambda} \cdot \frac{s}{1-k}$

8. Dyskusja wyprowadzonych wzorów do obliczania średniej prędkości gniotu

W wyniku przeprowadzonych rozważań proponuje się dwa nowe wzory do obliczania średniej prędkości gniotu przy uwzględnieniu poszerzenia:

a) wzór uproszczony

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{v_w}{l_d} \frac{\lambda + 1}{\lambda} \frac{s}{2} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (62)$$

b) wzór pełny:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{v_w}{l_d} \frac{\lambda - 1}{\lambda} \frac{s}{1 - k} \quad (63)$$

W związku z przyjęciem prostoliniowej zmiany prędkości przepływu metalu przez szczelinę walców, wzór (62) będzie obarczony pewnym błędem, który można określić przez porównanie wyników obliczeń z wielkościami pomierzonymi.

W przypadku walcowania bez poszerzenia ($\beta = 1$ oraz $\lambda = \frac{1}{\gamma} = \frac{h_1}{h_2}$) wzór ten sprowadzi się do postaci:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{v_w}{h_2} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} (1 - 0,5\epsilon) s \quad (65)$$

Zakładając dodatkowo przywieranie metalu do walców ($s = 1$, co zresztą jest sprzeczne z przyjęciem $\beta = 1$) wzór ten można sprowadzić do postaci analogicznej do wzoru Orowana

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{v_w}{h_2} \frac{\Delta h}{R} (1 - 0,5\epsilon) \quad (66)$$

W przypadku walcowania z przywieraniem wzdłuż całej szczeliny walców $\lambda = \frac{D}{\cos \alpha} = \frac{D}{D - \Delta h}$ i $s = 1$, wzór (62) można sprowadzić do postaci:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{v_w}{h_2} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} (1 - 0,5\epsilon \frac{h_1}{D}) \quad (67)$$

Zarówno w przypadku walcowania bez poszerzenia, jak też z przywieraniem metalu wzdłuż całej szczeliny walców rozkład prędkości przepływu przez szczelinę walców znacznie odbiega od założonego przebiegu prostoliniowego. Z tego powodu wyrażenia (66) i (67) dla przebiegów granicznych obciążone są znacznie większymi błędami niż wzór (62) ważny dla przypadku rzeczywistego walcowania.

Wzór (63) wyprowadzono natomiast bez dodatkowych założeń upraszczających, poza ogólnie przyjętymi i omówionymi w punkcie 5. Funkcję zmiany szerokości walcowanego pasma w szczelinie walców przyjęto zgodnie z przebiegiem najbardziej zbliżonym do rzeczywistego [23].

Wielkość współczynnika wyprzedzania s przyjęto zgodnie z najnowszymi [24] badaniami.

Na tej podstawie można przypuszczać, że średnie prędkości gniotu, obliczone proponowanym pełnym wzorem lub wzorami powstałymi z jego uproszczenia będą praktycznie zgodne z wielkościami rzeczywistymi.

W przypadku walcowania bez poszerzenia (np. w wykrojach zamkniętych) $\beta = 1$ i $k = 0$, zaś

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_w}{R \sin \alpha} s \frac{\lambda - 1}{\lambda} \quad (68)$$

Ponieważ jednak dla $\beta = 1$ $\lambda = \frac{1}{\gamma} = \frac{h_1}{h_2}$, wzór (68) można sprowadzić do postaci

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_2}{h_1} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} s \quad (69)$$

podanej przez Iarke, Celikowa i Mierenkova.

Jeżeli założy się, że wzdłuż całej szczeliny walców występuje przywieranie, wówczas współczynnik wyprzedzania równy jest jedności $s = 1$ zaś $\lambda = \frac{1}{\cos \alpha} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta h}{D}} = \frac{D}{D - \Delta h}$.

W takim przypadku współczynnik k przyjmuje swą maksymalną wartość

$$k_{\max} = \frac{\ln \beta}{\ln 1/\gamma} = \frac{\ln \frac{1}{\lambda \cdot \gamma}}{\ln 1/\gamma} = \frac{\ln(1 - \frac{\Delta h}{D}) + \ln 1/\gamma}{\ln 1/\gamma} \quad (70)$$

zaś

$$k - 1 = \frac{\ln \left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right)}{\ln \frac{h_1}{h_2}} \quad (71)$$

Wtedy

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \frac{\Delta h}{D} \frac{\ln \frac{h_1}{h_2}}{\ln \left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right)} \quad (72)$$

Jeżeli założyć dodatkowo, że $\frac{\Delta h}{D}$ jest małe w stosunku do jedności, można przyjąć

$$\ln \left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right) \approx -\frac{\Delta h}{D} \quad (73)$$

Wzór (72) uprości się wówczas do postaci

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_w}{\Delta h} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (74)$$

podanej przez Larko¹⁾, Korolewa i Cooka. Wzory (8) i (69) ważne są dla przypadków występowania poślizgu na całej długości szczeliny walców, zaś wzory (9) i (74) dla przypadków, gdy na całej długości łuku styku występuje przywieranie metalu do walców. Ponieważ wzory te wynikają z pełnego wzoru zaproponowanego przez autora po przyjęciu skrajnych przypadków walcowania, można wyrazić pogląd, że pełny wzór autora jest wzorem ogólnym, obejmującym wszystkie praktyczne przypadki walcowania (a więc również takie, w których występuje jednocześnie strefa poślizgu i strefa przywierania).

Dotychczasowe wzory (8) i (9) wyprowadzone na drodze matematycznej przy stałej szerokości walcowanego pasma stanowią jedynie szczególne przypadki wzoru (63).

9. OPRACOWANIE METODY POMIARU ŚREDNIEJ PRĘDKOŚCI GNIOU I PRZYSTOSOWANEJ DO NIEJ APARATURY ORAZ SPOSÓB PROWADZENIA POMIARÓW

W dostępnej w kraju literaturze technicznej brak dotychczas wzmianek o metodach bezpośredniego lub pośredniego pomiaru średniej prędkości gniołu przy walcowaniu.

W związku z tym nie można było dotychczas porównać wyliczonych na podstawie poszczególnych wzorów wartości średniej prędkości gniołu z wartościami rzeczywistymi. Wydaje się również, że w najbliższej przyszłości nie uda się jeszcze opracować metody bezpośredniego pomiaru prędkości gniołu.

Istnieje natomiast możliwość dokonania pośrednich pomiarów średniej prędkości odkształcenia przy różnych rodzajach przeróbki plastycznej, w tym również w czasie walcowania.

Przyjmując określenie średniej prędkości odkształcenia zgodnie z wyrażeniem (44)

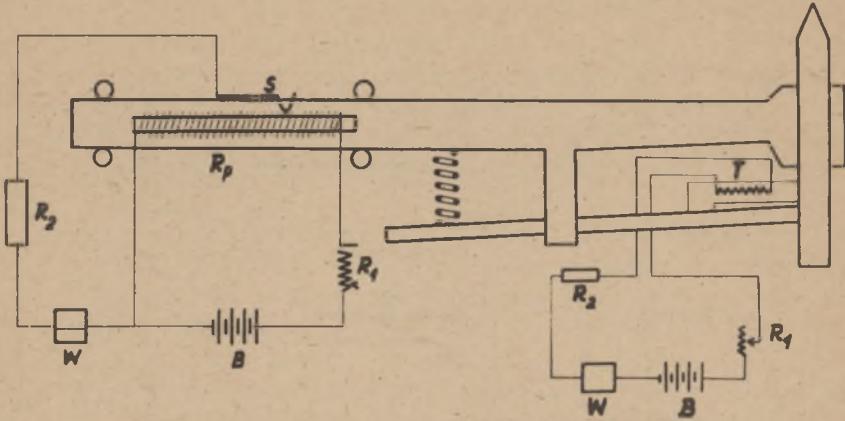
$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (44)$$

należy jedynie opracować metodę pomiaru czasu, w jakim zachodzi określone odkształcenie, gdyż pomiar wielkości h_1 i h_2 nie następuje żadnych trudności.

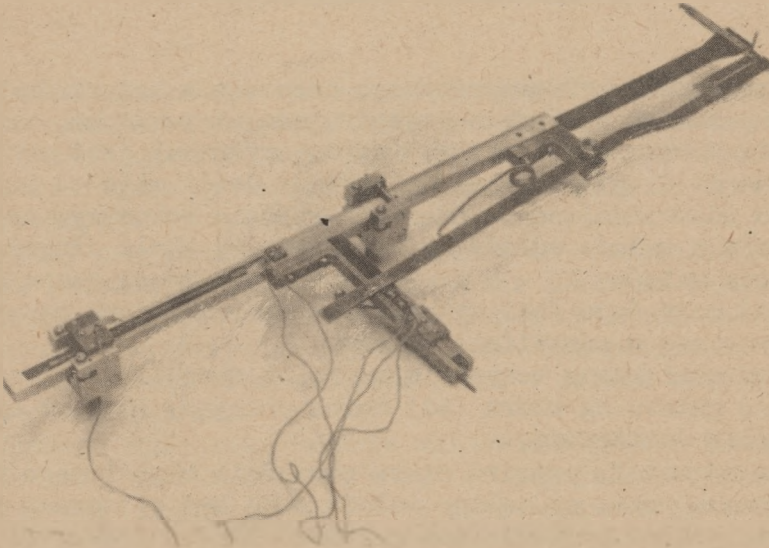
Czas w jakim zachodzi określone odkształcenie będzie w przypadku walcowania równy czasowi przejścia określonego przekroju walcowanego pasma przez szczelinę walców.

Do pomiaru tego czasu można zastosować skonstruowany przez autora przyrząd, którego zasadę działania przedstawiono na rys.7. Rys.8 przedstawia zdjęcie wykonanego i zastosowanego w czasie pomiarów przyrządu.

Po wprowadzeniu próbki między walce ramię przyrządu 1 wprowadzono między walce i przed wejściem określonego przekroju w szczelinę walców wbijano w metal końcówkę 3, przez co następowało sprzężenie przyrządu z odpowiednim przekrojem walcowanego pasma. Teraz ramię 1 przesunęło się już z prędkością równą prędkości punktu sprzężenia przyrządu z próbką. Przesunięcie ramienia, prowadzonego w prowadnicach 2 w kierunku walcowania rejestrowano przy pomocy rejestratora szybkopiszącego (Hottinger) przy stałym posuwie taśmy. Specjalny znacznik, umieszczony na końcówce przyrządu oznaczał moment przejścia rozpatrywanego przekroju pasma

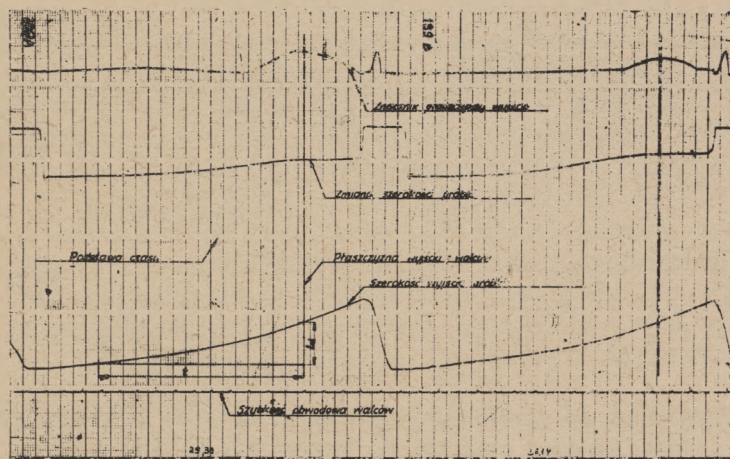


Rys.7. Przyrząd do pomiaru prędkości metalu i czasu przejścia określonego przekroju przez szczelinę walców



Rys.8. Widok ogólny przyrządu bez aparatury pomiarowej

przez płaszczyznę wyjścia z walców. Przykład uzyskanego w taki sposób zapisu przedstawiono na rys.9.



Rys.9. Przykład zapisu prędkości obwodowej walców i prędkości określonego punktu próbki

Na podstawie przeprowadzonego cechowania przyrządu łącznie z aparaturą pomiarowo-rejestrującą stwierdzono, że wychylenie pisaka rejestratora (rzędna wykresu) jest proporcjonalne do drogi ramienia przyrządu. Jeśli więc od punktu wykresu odpowiadającego momentowi wyjścia rozpatrywanego przekroju z walców odłożyć w odpowiedniej skali długość szczeliny walców $l_d = R \sin \alpha$, można z wykresu bezpośrednio odczytać czas (odcięta wykresu), w którym badany przekrój znajdował się w szczelinie walców.

Mając pomierzone wszystkie czynniki określające średnią prędkość gniotu wg wzoru (44) można przyjąć, że jest ona prędkością pomierzoną.

Opisana metoda pomiaru czasu przejścia określonego przekroju pasma przez szczelinę walców może być stosowana jedynie przy małych prędkościach walcowania. Dla prędkości większych można wykorzystać do pomiaru czasu przejścia punktu pasma przez szczelinę walców metodę atomów znaczących. W takim przypadku należałoby umieścić czujniki w ściśle określonych odległościach przed i za walcarką i przy ich pomocy rejestrować czasy przejścia określonego punktu

przez poszczególne odcinki drogi. Mierząc szybkości wejścia i wyjścia pasma z walców można by dokładnie określić czas przejścia atomu znaczonego przez szczelinę walców.

Można również w inny sposób rejestrować szybkości wejścia i wyjścia metalu z walców oraz czas przejścia określonego przekroju pasma pomiędzy dwoma umiejscowionymi po obu stronach walcarki punktami i stąd wyliczyć czas przejścia tego przekroju przez szczelinę walców. Metody te kryją jednak więcej możliwości błędów niż metoda zastosowana przez autora.

Uzyskany w czasie pomiarów zapis drogi określonego przekroju próbki w funkcji czasu zezwala również na dokonanie pomiaru prędkości przepływu badanego przekroju przez szczelinę walców. Pomierzone prędkości przepływu metalu przez szczelinę walców naniesiono na wykres rys.4. Z porównania krzywej doświadczalnej z krzywą teoretyczną (wzór 36) wynika zadawalająca zgodność pomiarów z obliczeniami.

10. PRÓBY I WYNIKI POMIARÓW

Celem omawianego wycinka prób było dokonanie pomiarów czasu przejścia poszczególnych przekrojów walcowanych próbek przez szczelinę walców. Mierzono przy tym również pozostałe parametry niezbędne do przeprowadzenia przeliczeń kontrolnych.

Próby przeprowadzono na walcance doświadczalnej w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach. Średnice czynne użytych walców były równe 331 mm. Oprócz opisanej aparatury specjalnej wykorzystano istniejące w IMŻ przyrządy i aparaturę pomiarową, stosowaną normalnie w czasie kompleksowych pomiarów walcarek.

Pomiary wykonano w czasie walcowania próbek kwadratowych Φ 40 mm i płaskich Φ 100 x 20 o długościach około 600 mm. Temperatura nagrzania próbek w piecu gazowym wynosiła kolejno 900, 1000 i 1100°C. Stosowane gnioty dla poszczególnych próbek wynosiły od 10 - 80 %. Mierzono wymiary każdej próbki przed i po przepuszczeniu, temperaturę próbki w czasie przepustu, prędkość obwodową walców i prędkość przepływu metalu przez szczelinę walców oraz wyprzedzenie i średnią prędkość gniotu (czas przejścia określonego punktu przez szczelinę walców).

Tablica 2

Dane pomiarowe oraz powstawowe wielkości przy walcowaniu kwadratów 40 x 40 mm
temperatura pieca 1000 °C

Lp.	Nr próbki	Nr wykresu	b ₁ mm	h ₁ mm	F ₁ mm ²	b ₂ mm	h ₂ mm	F ₂ mm ²	v _w mm/sek	v ₂ mm/sek	b _{śr} mm	γ	β _{sr}	$\lambda_{obit} = \frac{1}{\beta_{sr} \gamma}$	α	l _d mm	s _{szacoz}	t sek	ξ _{pom.} sek ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	51 A	35	39,6	40,2	1552	42,7	32,8	1315	29,501	30,406	40,10	0,8159	1,0126	1,2104	12°08'	34,79	1,0310	1,250	0,1627
2	52 C	36	39,9	39,8	1548	42,8	33,2	1350	29,776	30,682	40,66	0,8342	1,0190	1,1764	12°18'	35,26	1,0304	1,237	0,1465
3	61 C	37	40,2	40,5	1280	44,3	31,0	1310	29,736	30,682	42,26	0,7692	1,0512	1,2367	13°57'	38,96	1,0318	1,439	0,1824
4	62 B	38	40,2	40,2	1570	44,7	31,0	1330	29,603	30,406	42,90	0,7711	1,0672	1,2152	13°32'	38,73	1,0271	1,428	0,1821
5	71 B	39	41,1	41,2	1653	46,5	28,5	1280	29,782	30,958	44,91	0,6917	1,0927	1,3231	15°55'	45,39	1,0395	1,752	0,2104
6	72 C	40	39,8	41,0	1592	47,8	28,7	1315	29,562	30,406	45,82	0,7000	1,1512	1,2409	15°45'	44,92	1,0286	1,721	0,2073
7	81 C	41	40,3	39,5	1532	50,0	25,4	1210	29,324	30,406	47,64	0,6303	1,1821	1,3421	17°01'	48,43	1,0369	1,923	0,2400
8	82 C	42	40,3	40,1	1556	50,6	24,6	1195	29,376	30,406	48,28	0,6135	1,2052	1,3321	17°36'	50,04	1,0351	1,945	0,2512
9	91 C	43	40,0	40,0	1560	57,1	20,3	1125	28,785	30,406	55,42	0,5075	1,3855	1,4222	19°52'	56,24	1,0263	2,400	0,2826
10	92 D	44	40,1	40,1	1568	58,8	20,3	1135	28,591	29,786	55,91	0,5062	1,3943	1,4168	19°53'	56,38	1,0418	2,310	0,2947
11	252 B	181	40,1	38,9	1520	53,4	14,4	744	31,930	34,282	54,67	0,3609	1,2885	1,1504	22°38'	63,69	1,0736	2,655	0,3839
12	253 C	182	40,3	39,5	1542	55,8	15,8	950	31,680	34,001	60,13	0,4000	1,4921	1,6755	21°49'	61,51	1,0733	2,351	0,3889
13	254 B	183	40,2	40,1	1572	58,0	16,0	884	31,947	34,292	55,25	0,3990	1,3444	1,8235	22°00'	62,00	1,0731	2,4431	0,3780
14	255 C	184	39,7	40,2	1546	70,9	11,4	792	30,749	34,282	69,47	0,2835	1,7499	2,0157	24°05'	67,53	1,1149	2,725	0,4626
15	256 B	185	40,3	40,1	1566	65,8	11,1	704	31,060	34,563	63,42	0,2768	1,5737	2,2957	24°10'	67,75	1,1128	2,960	0,4339
16	257 C	186	40,0	40,1	1564	67,8	11,7	770	30,448	33,722	65,81	0,2918	1,6453	2,0829	23°54'	67,05	1,1075	2,810	0,4383
17	258 B	187	40,1	40,1	1568	68,2	11,6	765	30,846	34,282	65,95	0,2893	1,6446	2,1018	23°57'	67,18	1,1114	2,935	0,4226
18	260 C	189	40,1	40,1	1568	66,1	8,7	561	27,839	32,335	64,48	0,2170	1,6080	2,8659	25°09'	70,34	1,1615	3,784	0,3943
19	261 B	190	39,4	40,5	1556	68,7	8,7	582	27,590	32,059	66,90	0,2148	1,6980	2,7417	25°19'	70,77	1,1637	4,141	0,3715
20	262 C	191	40,1	40,1	1568	76,6	9,0	670	26,713	30,691	74,44	0,2244	1,8564	2,4005	25°02'	70,02	1,1489	3,556	0,4203

Mierzono również naciski na walce oraz momenty obrotowe każdego walca oddzielnie. Tych ostatnich pomiarów jednak w niniejszej pracy nie wykorzystano.

Wszystkie mierzone przebiegi rejestrowano przy pomocy rejestratorów szybkopiszących firmy Hottinger. Zapisy z taśmy rejestracyjnej odczytywano przy pomocy mikroskopu warsztatowego Katedry Obróbki Skrawaniem, przy powiększeniu 35 krotnym.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów oraz wyniki podstawowych przeliczeń dla ϕ 40 mm i temperatury pieca 1000°C zestawiono w tabelicy 2.

11. ANALIZA MOŻLIWEGO BŁĘDU POMIARÓW

Za podstawę do analizy możliwego błędu pomiarów średniej prędkości gniotu przyjęto wzór (44).

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (44)$$

Wymiary próbek mierzono przy pomocy summiarki warsztatowej o dokładności odczytu $\pm 0,05$ mm. Błąd względny pomiarów wysokości może więc wynosić od $\frac{0,05}{40} = 0,125\%$ do $\frac{0,025}{10} = 0,25\%$. Błąd określenia stosunku $\frac{h_1}{h_2}$ może więc wynosić 0,375%.

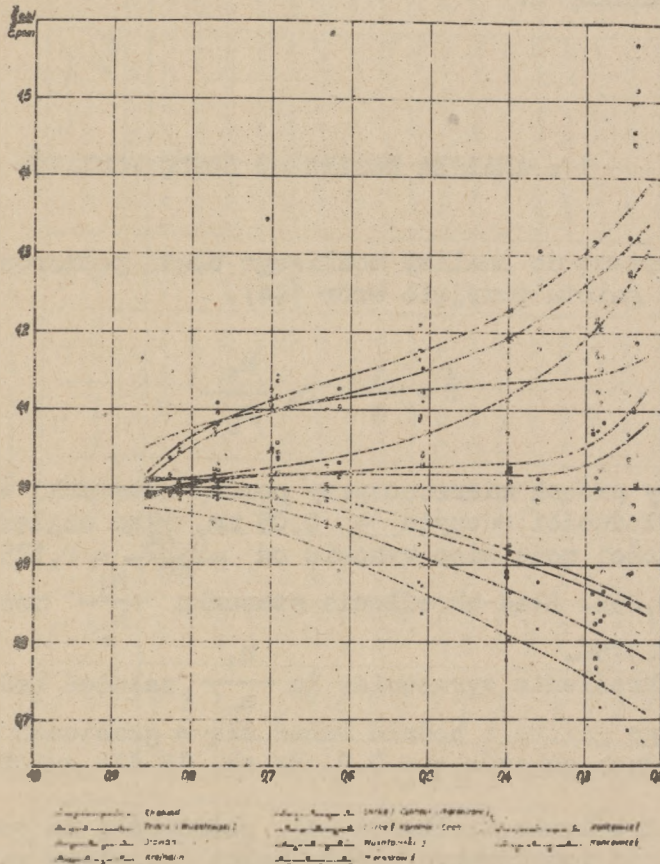
Błąd określenia wyrażenia: $\ln \frac{h_1}{h_2}$ zależęć będzie od stosowanego gniotu i będzie wahać się w granicach od około 3% dla małych gniotów $\gamma = 0,9$ do ok. 1% dla gniotów dużych $\gamma = 0,2$.

Błąd określenia wielkości l_d , potrzebnej do pomiaru czasu przejścia rozważanego punktu przez szczelinę walców można określić szacunkowo na ok. 0,5%. Błędy odczytu wielkości t pod mikroskopem warsztatowym nie przekraczają 0,5% wartości prawdopodobnych.

Łączny błąd, możliwy do popełnienia przy starannym przeprowadzeniu pomiaru średniej prędkości gniotu nie przekracza więc 3,5% wartości nominalnych.

12. PORÓWNANIE WYNIKÓW PRZELICZEŃ PRZY POMOCY OMÓWIONYCH WZORÓW DOTYCHCZASOWYCH I WZORÓW AUTORA Z WYNIKAMI POMIARÓW

Dla warunków walcowania, w jakich przeprowadzono pomiary przeliczono średnie prędkości gniotu przy pomocy zestawionych w tablicy 1 wzorów i uzyskane wyniki odniesiono do wartości pomierzonych. Wartości stosunków $\frac{\bar{\epsilon}_{obl}}{\bar{\epsilon}_{pom}}$ dla $\phi 40$ mm i temperatury pieca 1000°C zestawiono w tablicy 3 i nanie-siono na wykres rys.10.



Rys.10. Porównanie wielkości $\bar{\epsilon}$ pomiarowych i wyliczonych wg różnych autorów dla $\phi 40 \times 40$. Temperatura pieca 1000°C .

Porównania wielkości ξ pomierzonych i wyliczonych wg różnych autorów dla kwadratów 40 x 40 mm
Temperatura płieca 1000 °C

Lp.	Nr próbki	wg Kociubina		wg Trinka i Husatowskiego I		wg Orwana		wg Krejndlina		wg Larso'a I Cielikowa i Mierenkowa I		wg Larso'a II Korołowa i Cooka		wg Husatowskiego II		wg Mierenkowa II		wg autora I /opr./		wg autora II		
		ξ_{obl} sek ⁻¹	$\frac{\xi_{obl}}{\xi_{pom}}$	ξ_{obl} sek ⁻¹	$\frac{\xi_{obl}}{\xi_{pom}}$	ξ_{obl} sek ⁻¹	$\frac{\xi_{obl}}{\xi_{pom}}$	ξ_{obl} sek ⁻¹	$\frac{\xi_{obl}}{\xi_{pom}}$	ξ_{obl} sek ⁻¹	$\frac{\xi_{obl}}{\xi_{pom}}$	ξ_{obl} sek ⁻¹	$\frac{\xi_{obl}}{\xi_{pom}}$	ξ_{obl} sek ⁻¹	$\frac{\xi_{obl}}{\xi_{pom}}$	ξ_{obl} sek ⁻¹	$\frac{\xi_{obl}}{\xi_{pom}}$	ξ_{obl} sek ⁻¹	$\frac{\xi_{obl}}{\xi_{pom}}$	ξ_{obl} sek ⁻¹	$\frac{\xi_{obl}}{\xi_{pom}}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	51A	0,1627	0,1708	0,0498	0,1251	0,9233	0,1638	1,0068	0,1612	0,9908	0,1599	0,9828	0,1718	1,0259	0,1626	0,9994	0,1699	1,0443	0,1616	0,9932	0,1618	0,9945
2	52C	0,1465	0,1747	1,1925	0,1602	0,0935	0,1882	1,1481	0,1455	0,9932	0,1651	1,1270	0,1522	0,0389	0,1680	1,1468	0,1490	1,0171	0,1431	0,9904	0,1457	0,9945
3	67C	0,1824	0,1972	1,0811	0,1741	0,9945	0,1880	1,0307	0,1826	1,0041	0,1796	0,9846	0,2023	1,1091	0,1835	1,0060	0,2000	1,0962	0,1811	0,9929	0,1868	1,0241
4	62B	0,1821	0,1961	1,0769	0,1736	0,9235	0,1885	1,0242	0,1799	0,9879	0,1738	0,9544	0,1956	1,0741	0,1821	1,0000	0,1947	1,0692	0,1845	0,1037	0,1854	1,0181
5	71B	0,2104	0,2366	1,1245	0,2002	0,9915	0,2225	1,0575	0,2185	1,0385	0,2081	0,9891	0,2334	1,1259	0,2092	1,0092	0,2293	1,1179	0,2186	1,0390	0,2200	1,0456
6	72C	0,2073	0,2312	1,1153	0,1965	0,9479	0,2176	1,0497	0,1999	0,9643	0,2021	0,9749	0,2334	1,1259	0,2092	1,0092	0,2293	1,1061	0,2167	1,0453	0,2169	1,0463
7	81C	0,2400	0,2675	1,1146	0,2197	0,9154	0,2469	1,0287	0,2236	0,9567	0,2278	0,9492	0,2642	1,1008	0,2336	0,9817	0,2583	1,0762	0,2391	0,9962	0,2410	1,0042
8	82C	0,2512	0,2777	1,1055	0,2241	0,8921	0,2595	1,0326	0,2391	0,9518	0,2320	0,9236	0,2832	1,1274	0,2405	0,9574	0,2772	1,1035	0,2551	1,0155	0,2559	1,0187
9	91C	0,2826	0,3094	1,1656	0,2483	0,8786	0,3085	1,0916	0,2837	1,0039	0,2615	0,9253	0,3418	1,2095	0,2747	0,9720	0,3328	1,1776	0,3074	1,0877	0,3089	1,0931
10	92D	0,2947	0,3275	1,1113	0,2466	0,8366	0,3068	1,0411	0,2651	0,8996	0,2569	0,8717	0,3399	1,1534	0,2691	0,9131	0,3309	1,1228	0,3021	1,0251	0,3037	1,0305
11	252B	0,3839	0,4617	1,2027	0,3141	0,8182	0,4533	1,1808	0,3768	0,9815	0,3272	0,8784	0,5011	1,3023	0,2982	0,9331	0,4851	1,2636	0,3885	1,0120	0,3835	0,9990
12	253C	0,3789	0,4335	1,1118	0,3035	0,7784	0,4173	1,0703	0,3474	0,8910	0,3227	0,8353	0,4649	1,1924	0,3446	0,8838	0,4498	1,1536	0,3970	1,0182	0,3981	1,0210
13	254B	0,3780	0,4346	1,1497	0,3040	0,8042	0,3880	1,0265	0,3300	0,9259	0,3262	0,8630	0,4646	1,2291	0,3494	0,9738	0,4502	1,1910	0,3860	1,0212	0,3815	1,0093
14	255C	0,4626	0,4972	1,0748	0,3119	0,6742	0,5206	1,1254	0,3612	0,7808	0,3558	0,7691	0,5642	1,2131	0,3812	0,8240	0,5417	1,1710	0,4679	1,0115	0,4600	0,9944
15	256B	0,4339	0,5079	1,1705	0,3242	0,7472	0,5360	1,2353	0,3759	0,8663	0,3608	0,8315	0,5759	1,3273	0,3868	0,8944	0,5559	1,2812	0,4712	1,0860	0,4449	1,0254
16	257C	0,4383	0,4875	1,1123	0,3146	0,7178	0,5056	1,1535	0,3631	0,8284	0,3484	0,7949	0,5471	1,2482	0,3726	0,8501	0,5283	1,2053	0,4483	1,0228	0,4389	1,0014
17	258B	0,4226	0,4952	1,1718	0,3192	0,7553	0,5153	1,2194	0,3648	0,8632	0,3547	0,8393	0,5571	1,3183	0,3997	0,8985	0,5379	1,2728	0,4563	1,0797	0,4524	1,0705
18	260C	0,3943	0,4970	1,2605	0,3024	0,7669	0,5754	1,4293	0,3859	0,9787	0,3512	0,8907	0,5901	1,4966	0,3786	0,9602	0,5690	1,4431	0,4622	1,1722	0,4343	1,1014
19	261B	0,3715	0,4908	1,3211	0,2981	0,8024	0,5706	1,5259	0,3848	1,0398	0,3469	0,8338	0,5840	1,5720	0,3745	1,0081	0,5625	1,5152	0,4635	1,2476	0,4398	1,1838
20	262C	0,4503	0,4717	1,1523	0,2887	0,6865	0,5382	1,2805	0,3736	0,8889	0,3347	0,7892	0,5562	1,2233	0,3774	0,8503	0,5364	1,2762	0,4525	1,0766	0,4363	1,0381

Z wykresu tego wynika, że błąd względny wszystkich wzorów wzrasta wraz z gniotem. Wzory Ekelunda (1), Orowana (4), Larke'a II (9) i Mierenkowa (17) dają wartości za duże w całym zakresie gniotów, zaś wzory Trinksa (2) Krejndlina (6) Larke I (8) i Wusatowskiego II (15) wartości za małe. Można przyjąć, że wartości za małe dają wszystkie wzory wyprowadzone przy założeniu poślizgu, zaś za duże - wzory uwzględniające przywieranie na całej długości łuku styku.

Można również przyjąć, że wyniki najbardziej zbliżone do wartości pomierzonych dają wzory autora, przy czym wzór pełny (61) obarczony jest mniejszym błędem niż wzór uproszczony (53).

Błąd względny wzoru pełnego nie przekracza 2% w zakresie gniotów do 60%. Błąd względny wzoru uproszczonego dochodzi w tym zakresie gniotów do 3%. Wszystkie pozostałe wzory dają przy gniocie 60% błędy przekraczające 8 - 10%.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i przeliczeń kontrolnych można zestawić kilka najdokładniejszych wzorów w następującej kolejności:

- 1) pełny wzór autora (61),
- 2) uproszczony wzór autora (53),
- 3) wzór Wusatowskiego (15),
- 4) wzór Krejndlina (6),
- 5) wzór Larke'a, Celikowa i Mierenkowa I (8).

13. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych rozważań oraz prób technologicznych można sformułować następujące wnioski:

1. Prędkość gniotu przy walcowaniu jest zbliżona do maksymalnej prędkości odkształcenia względnego.
2. Wartość prędkości gniotu w rozważanym przekroju walcowanego pasma zależy od odległości tego przekroju od płaszczyzny wyjścia z walców.
3. Funkcja zależności chwilowych prędkości gniotu od położenia rozważanego przekroju może w określonych warunkach walcowania posiadać maksimum.
4. W obliczeniach średniej prędkości gniotu nie można pomijać wpływu poszerzenia pasma w szczelinie walców.
5. Wszystkie wzory do obliczania średniej prędkości gniotu, nie uwzględniające wpływu poszerzenia muszą być obarczone znacznym błędem.
6. Najbardziej zbliżone wartości średniej prędkości gniotu do wartości pomierzonych dają wzory zaproponowane przez autora.
7. Do obliczenia średniej prędkości gniotu przy walcowaniu należy stosować wzory autora, przy czym bardziej godnym polecenia jest wzór pełny.
8. Celowe byłoby przeprowadzenie serii kontrolnych pomiarów średniej prędkości gniotu przy normalnie stosowanych prędkościach walcowania oraz przy zastosowaniu zaproponowanej metody pomiaru (przy pomocy atomów znaczonych) czasu przejścia określonego przekroju przez szczelinę walców.

14. LITERATURA

- [1] S.Ekelund: Några dynamiska förhållanden vid valsning. Jernkontorets Annaler 1927, s.39.
- [2] E.Siebel i A.Pomp: Mitteilungen der K-W Institut für Eisenforschung, t.9, 1927, s.157.
- [3] L.Żarnowski: Gorąca przeróbka plastyczna żelaza i stali cz.II. Kuźnictwo, Katowice 1947.
- [4] E.P.Unksow: Nowoje w tiechnozogii goriaczej szampowki,, Maszgiz. 1948.
- [5] P.M.Cook: True stress-strain curves for steel in compression at high temperatures and strain rates, for application to the calculation of load and torque in rolling. Proceedings of Conference on Properties of Materials at High Rates of Strain. Inst.Mechanical Eng. 1957.
- [6] V.Valorinta: Untersuchungen über den Einfluss von Temperatur und Formänderungs-geschwindigkeit auf den Formänderungs-widerstand einiger Stähle. Werkstattstechnik u.Maschinenbau 1958, nr 8, s.452.
- [7] C.Rossard, P.Blain: Phénomènes transitoires au cours de la déformation à chaud de l'acier par traction à vitesse rationnelle de déformation constante Acad.Sc. 1958.
- [8] K.Weber: Berechnungsunterlagen zur Ermittlung von Walzkraft und Drehmoment beim Warmwalzen (nach R.B.Sims). Freiburger Forschungshefte B 46, 1959.
- [9] C.Rosard, P.Blain: Badania plastycznych odkształceń stali na gorąco. Obróbka plastyczna t.II, z.1, 1960.
- [10] V.Valorinta: Wpływ temperatury i prędkości odkształcenia na opór plastyczny przy kuciu. Obróbka plastyczna. t.II, z.1, 1960.

- [11] S.Koncewicz: Wzory określające wytrzymałość plastyczną kilku stali. Obróbka plastyczna. t.II, z.1, 1960.
- [12] W.Trinks: Kalibrowanie walców, Katowice, 1947.
- [13] Z.Wusatowski: Podstawy procesu walcowania. PWT, 1952.
- [14] N.N.Krejndlin: Razziot obzatiij pri prokatie listow i lent iz cwietych mietaków i spławow. Mietakurgizdat, 1950.
- [15] E.C.Larke: Sheet Metal Industries 32, 1955, s.861/66,
- [16] E.C.Larke: The rolling of strip, sheet and plate, 1957.
- [17] A.J.Celikow: Formuła dla tocznowo opriedielenija sredniej skorosti dieformacji pri prokatie. Sbornik "Prokatnyje stany" CNIITMASZ, nr 73, Maszgifz. 1955, s.277/9.
- [18] A.A.Korolew: Izmienienija priedieła tiekuczesti mietakła po dugie zachwata wałka pri prokatie. Sbornik "Prokatnyje stany" CNIITMASZ, nr 83, Maszgifz. 1956, s.217/24.
- [19] Z.Wusatowski: Intensywność odkształcenia w procesie walcowania. Prace Instytutów Hutnictwa, z.2, t.10, 1958, s.120/23.
- [20] P.M.Cook i A.W.Mc Crum: The calculation of load and torque in hot flat rolling BISRA, 1958.
- [21] E.P.Unksow: Inżynierskaja teorija płasticznosti, Maszgifz. 1959.
- [22] Z.Wusatowski: Podstawy walcowania. WGH, 1960.
- [23] W.N.Wydrin: Dynamika prokatnych stanow. Mietakurgizdat, 1960.
- [24] S.Koncewicz: Wyprzedzanie i kąt płaszczyzny podziałkowej przy walcowaniu na gorąco z uwzględnieniem poszerzania. Praca doktorska (1961).
- [25] A.J.Mierenkow: Wlijanije skorosti dieformacji na wieliczinu soprotiwlenija płasticzeskoj dieformacji pri protakie. Izwiestia Wyższych Uczebnych Zawiedenij. Maszynostrojenije, 1961, nr 8, s.135/146.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej

P 3361 | 62

Druk. Pol. Sl. 1684-60 60000