Zygmunt Wusatowski, Eugeniusz Orzeł

Katedra Przeróbki Plastycznej

Wyznaczanie średnic czynnych i osi obojętnej wykroju przy walcowaniu kształtowników *

Omówienie metody wyznaczania średnic czynnych i osi obojętnej wykrojów od najstarszych do ostatnich opublikowanych w literaturze technicznej. Wyprowadzenie przez autorów nowych wzorów, które uwzględniają lepiej warunki płynięcia metalu. Porównanie wszystkich metod na wybranym ceowniku i omówienie wyników.

1. Wstęp

Prawidłowe obliczanie i wyznaczanie średnic czynnych i osi obojętnej wykroju stanowi jedno z podstawowych zagadnień każdego kalibrowania. Dlatego zagadnieniu temu od początków nowoczesnych metod kalibrowania poświęcono niemało trudu i prób. Osiągnięte jednak wyniki można uważać za prawidłowe tylko przy walcowaniu prostych, symetrycznych profilów, natomiast przy walcowaniu kształtowników pozostaje jeszcze wiele do zrobienia.

W miarę czasu nauczono się rozwiązywać poszczególne prostsze zagadnienia, jak na przykład profile o podwójnej symetrii lub profile o symetrii poziomej. W tej chwili czeka na rozwiązanie zagadnienie właściwego określania średnic czynnych i osi obojętnej wykroju przy walcowaniu kształtowników niesymetrycznych względem osi poziomej, ewentualnie całkowicie asymetrycznych.

Zagadnieniu temu zamierzamy poświęcić kilka kolejnych publikacji. W obecnej dokonano porównania i zestawienia wszystkich znanych opublikowanych dotychczas metod, w następnych zaś przeprowadzone będzie porównanie i wybór metod najlepszych w oparciu o wykonane praktyczne próby i badania.

---

* Ujęte w tekście określenia patrz poz. lit. 13, str. 159 do 161.

2. Zestawienie poszczególnych metod obliczania średnic czynnych i osi obojętnej wykroju kształtowników niesymetrycznych

Zagadnieniem wyznaczania osi obojętnej wykroju zajmowało się od dawna wielu kalibrowników walców. Część z nich nie wiązała tego zagadnienia bezpośrednio z średnicami czynnymi walców. Tłumaczyć to można tym, że znajomość średnic czynnych walców potrzebna jest wyłącznie do obliczania szybkości wejściowej i wyjściowej walcowania, co w starych walcowniach nie zawsze jest potrzebne. Natomiast obecnie w wysoko wydajnych walcowniach ciągłych, w których profil walcowy znajduje się w kilku klatkach równocześnie, wymaga się bardzo dokładnego obliczania szybkości wejściowej i wyjściowej, a więc także średnicy czynnej.

Jeśli stosunkowo łatwo oblicza się średnice czynne przy wykrojach ułożonych płasko, jak kwadratów i prostokątów, to już dla wykrojów okrągłych, owalnych, kwadratowych po przekątnej czy rombowych należy obliczać średnie średnice czynne, przy kształtownikach zaś zagadnienie to jest jeszcze bardziej złożone.

Ze średnicami czynnymi wiąże się bezpośrednio wyznaczanie osi obojętnej wykroju. Osią obojętną wykroju nazywamy prostą leżącą w płaszczyźnie wykroju, wyznaczoną teoretycznie w celu właściwego ułożenia wykroju w walcach.

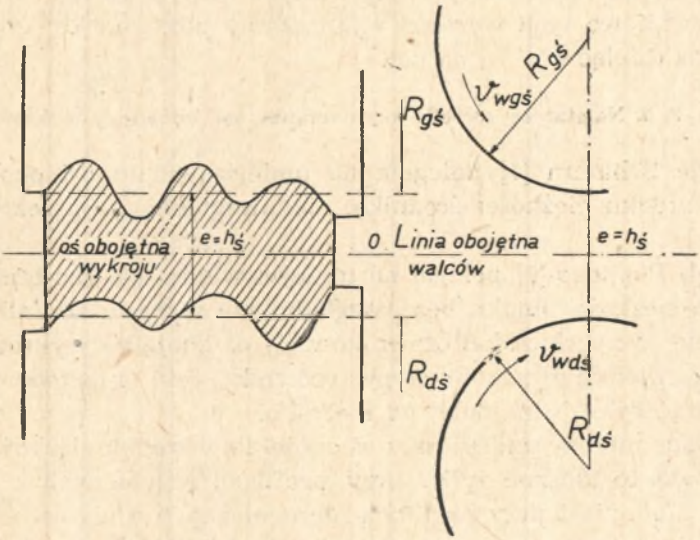
Należyte umieszczenie osi obojętnej wykroju na linii obojętnej walców powoduje wychodzenie metalu z walców w czasie swobodnego walcowania (to znaczy bez uzbrojenia walców) w ten sposób, że oś podłużna pręta pozostaje po wyjściu prosta, bez żadnych zakrzywień.

Przesunięcie osi obojętnej wykroju ponad lub pod linię obojętną walców powoduje przegięcie pręta w górę lub w dół, ponieważ szybkości obwodowe walców stykających się wzdłuż niej będą różne.

Właściwe wyznaczanie osi obojętnej wykroju warunkuje prawidłową pracę walcowni, szczególnie przy walcowaniu kształtowników. Jeżeli bowiem obie bruzdy ze sobą współpracujące mają różne średnie średnice czynne, wówczas walec o większej średnicy czynnej ciągnie za sobą profil walcowany i powoduje dodatkowy moment skręcający oraz nacisk na walce zębate. Przy wyjściu metalu z wykroju walce wracają do pierwotnego położenia, powodując uderzenie na całej linii napędu. Uderzenia te są tym większe, im większe są luzy w łącznikach. Są one szkodliwe i mogą powodować złamanie walca lub wyłamanie zębów w walcach zębatych lub coś w tym rodzaju. Walec zaś o mniejszej średnicy czynnej hamuje przepływ metalu przez walce, powiększając poślizg. Powoduje to dodatkowe wady na powierzchni metalu. W takich warunkach walce szybciej

się wyrabiają, silnik zaś zużywa więcej energii na pokonanie szkodliwych oporów tarcia.

Walcowanie w wykrojach o różnych średnicach czynnych jest również szkodliwe dla metalu, w którym powstają naprężenia rozciągające, często przekraczające jego spójność. Literatura techniczna podaje wiele metod obliczania osi obojętnej i średnic czynnych wykroju, jednak brak jest pewności, który wzór i w jakich przypadkach można stosować. Dla lepszego zrozumienia zagadnienia przeanalizujemy schematycznie rysunek 1.



Rys. 1. Schemat walcowania profilów

Przypuśćmy, że walcujemy taki profil jak na rysunku 1; wtedy szybkość wychodzenia profilu z górnego walca określa $R_{g\acute{s}}$ średni górny promień czynny, zaś dla dolnego walca $R_{d\acute{s}}$ średni dolny promień czynny, oś obojętna wykroju 0 — 0, musi być tak położona na linii obojętnej walców, aby oba te promienie były sobie równe, a więc:

$$R_{g\acute{s}} = R_{d\acute{s}} = R_{\acute{s}} \tag{1}$$

Wtedy bowiem tylko jest możliwe otrzymanie takich warunków walcowania, aby szybkości obwodowe walca górnego i dolnego były sobie równe, czyli:

$$v_{wg\acute{s}} = v_{wd\acute{s}} = v_{w\acute{s}}, \tag{2}$$

a więc:

$$\frac{\pi D_{g\acute{s}} \cdot n}{60} = \frac{\pi D_{d\acute{s}} \cdot n}{60} = \frac{\pi D_{\acute{s}} \cdot n}{60}, \tag{2a}$$

jeśli n obroty obu walców są sobie równe.

Teoretycznie położenie osi obojętnej wykroju $O - O$ spełniające zależności (1 i 2) otrzymamy dzieląc odcinek e na pół, czyli:

$$O - O = \frac{e}{2} = \frac{h_ś}{2}.$$

W rzeczywistości działanie walca górnego jest nieco różne od walca dolnego, lecz bardzo trudne zadanie stanowiłoby właściwe określenie jego wpływu i odpowiednie podzielenie odcinka $e = h_ś$. Dlatego stosunkowo łatwiejsze zadanie stanowi analiza warunków walcowania dla każdego walca oddzielnie i odpowiednie poprawienie przyjętego $R_{śg}$ i $R_{śd}$. Po ustaleniu prawidłowo tych wartości wyznaczamy położenie osi obojętnej jak dotychczas dzieląc $e = h_ś$ na pół.

2. 1. Najstarsze metody wyznaczania osi obojętnej wykroju

Metoda Schäfera [1] polegała na umiejscowieniu osi obojętnej wykroju w środku ciężkości środnika, nie uwzględniając przez to wpływu stopek.

Sposób Puppego [1] polegał na umiejscowieniu osi obojętnej wykroju w środku ciężkości stopki, bez uwzględnienia wpływu środnika.

Według francuskich kalibrowników [1] oś obojętna wykroju przechodziła przez połowę wysokości stopek ceownika. Jest to metoda odsuwająca oś obojętną wykroju najdalej od środnika.

Następne metody umieszczały oś obojętną w środku ciężkości wykroju. [1, 2]. Było to słuszne tylko przy profilach regularnych o podwójnej symetrii. Natomiast przy profilach nieregularnych o nierówno rozłożonej masie umieszczanie osi obojętnej w środku ciężkości powoduje, że średnie średnice czynne, a co za tym idzie średnie szybkości metalu walca górnego i dolnego są różne.

Powoduje to zakrzywienie walcowanego profilu. Należy zaznaczyć, że kalibrownicy pracujący w naszych hutach posługiwali się głównie dotychczas tą metodą.

2.2. Nowsze metody wyznaczania średnic czynnych i osi obojętnej wykroju

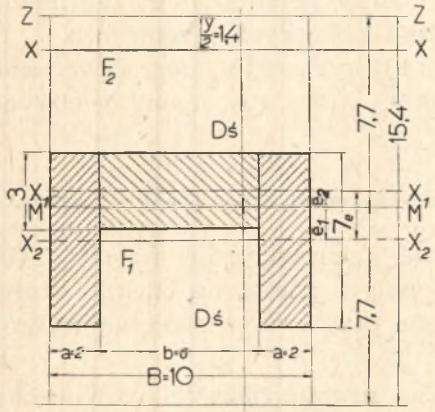
Próby wyznaczania osi obojętnej jako linii równych szybkości datują się od dość dawna. Należy do nich metoda W. Tafla [2], który wyznaczał linie przechodzące przez środki ciężkości poszczególnych elementów składowych profilu $x_1 - x_1$ i $x_2 - x_2$ (rys. 2). Odległość zaś pomiędzy tymi środkami ciężkości e rozdzielał odwrotnie proporcjalnie do długości odcinków poziomych (równoległych do osi walców) tych właśnie części składowych profilu. To znaczy przy przypadku jak na rysunku 2.

$$e = e_1 + e_2,$$

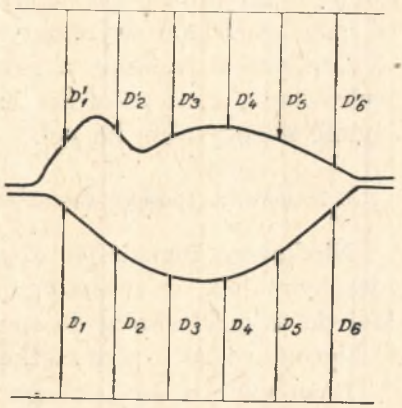
a więc

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{b}{2a} \tag{3}$$

W swojej metodzie Tafel uwzględnia wpływ odcinków wykroju skośnych ewentualnie prostopadłych do osi walca przez wyznaczenie środków ciężkości poszczególnych elementów profilu, sprowadzonych do prostokąta. Metoda ta pomija jednak przypadki, gdy długość poziomych odcinków prostych po obu stronach wykroju nie jest jednakowa, co nie jest słuszne. Błąd stąd wynikający nie jest zbyt duży i dlatego metoda Tafla cieszy się dotychczas dużą popularnością.



Rys. 2. Przykład obliczania osi obojętnej wykroju wg Tafla



Rys. 3. Wyznaczanie średnich szybkości walcowania metodą W. Dahla

Usiłował to poprawić W. Dahl [3] przez wyznaczenie średniej średnicy czynnej jednego wykroju jako średniej arytmetycznej ze wszystkich średnic czynnych wykroju, przy czym obliczył on najpierw średnią dla jednej bruzdy, potem dla drugiej, następnie zaś obliczał z nich średnią średnicę dla całego wykroju.

Metodę tę przedstawia schematycznie rysunek 3. Wynikają z niego następujące zależności:

$$\frac{D_1 \pi n}{60} + \frac{D_2 \pi n}{60} + \ldots + \frac{D_N \pi n}{60} = \frac{D_1' \pi n}{60} + \frac{D_2' \pi n}{60} + \ldots + \frac{D_N' \pi n}{60}; \tag{4}$$

gdzie n = obroty walców/min.

Po uproszczeniu:

$$D_1 + D_2 + \ldots + D_N = D_1' + D_2' + \ldots + D_N' \tag{4a}$$

Jeśli N wyraża ilość poszczególnych średnic, wtedy:

$$\frac{D_1 + D_2 + \ldots + D_N}{N} = \frac{D_1' + D_2' + \ldots + D_N'}{N} = D_s = D_s' \tag{4b}$$

Naszym zdaniem metoda ta jest mniej prawidłowa od sposobu Tafla, ponieważ dla obliczenia średniej średnicy czyni ona równoważnymi wszystkie średnice bez względu, czy odpowiadające im odcinki są proste, czy też skośne oraz bez względu na ich długość. Metoda taka nie może być słuszna, ponieważ nie wolno przyrównywać wpływu długiego odcinka do wpływu odcinka krótkiego, odcinki skośne zaś czy też prostopadłe w wielu przypadkach odgrywają z natury rzeczy dużo mniejszą rolę. Metoda ta może dać prawidłowe wyniki wyłącznie przy profilach złożonych z dużej ilości krzywizn.

Poważnym błędem obu metod Tafla i Dahla jest przyjęcie, że poszczególne części profilu otrzymują równomierny gniot. Dlatego też metody te mogą dać dobre wyniki tylko w kilku końcowych przepustach.

Otrzymane średnice z równania (4 b) wyznaczają średnie szybkości walcowania, a nie położenie linii obojętnej, którą otrzymamy dzieląc odległość między nimi na pół.

2.3. Najnowsze sposoby wyznaczania średnic czynnych i osi obojętnej wykroju

Niedawno Benad [4] zaproponował poprawkę do metody Tafla, uwzględniającą w większym stopniu wpływ gniotu na odcinki skośne. Metoda ta w stosunku do sposobu Tafla przesuwa oś obojętną wykroju w kierunku jego środka ciężkości.

Również metodę Lübkego [5] można nazwać dalszym rozwinięciem sposobu Tafla. Lübke oblicza czynne średnice obu bruzd, jak w przykładzie na rysunku 4. Następnie dzieli on odległość e czynnych średnic na pół.

Dla wykroju osadczego (rys. 4) podano następujący przykład: średnia średnica czynna górnego walca $D_{śg}$ sięga linię $O - O$, dla której $e_1 = 0$. Średnia średnica czynna dolnego walca leży w odległości e_2 od $O - O$, przy czym odległość e_2 obliczono następująco:

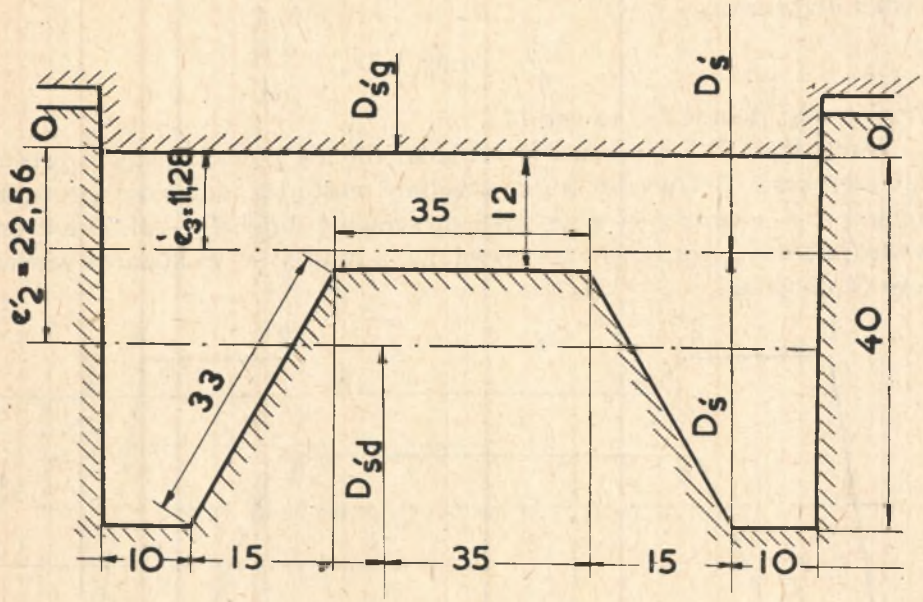
$$(2 \cdot 40) \cdot 20 + (2 \cdot 10) \cdot 40 + (2 \cdot 33) \cdot 26 + (35) \cdot 12 =$$
$$= (2 \cdot 40 + 2 \cdot 10 + 2 \cdot 33 + 35) \cdot e_2$$

a stąd:

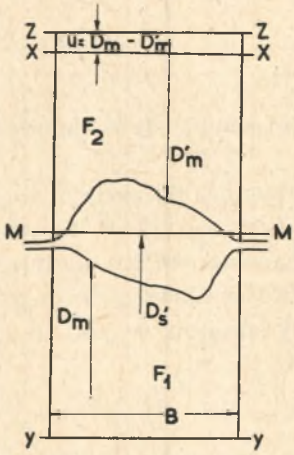
$$e_2 = 22{,}56 \text{ mm} \sim 22{,}6 \text{ mm}$$

Średnią średnicę wykroju wyznacza się w połowie pomiędzy $D_{śg}$ i $D_{śd}$, a więc przy $e_3 = 11{,}28$ mm od linii $O - O$. Przy bliższej analizie okazuje się, że metoda Lübkego jest bardzo zbliżona do pierwszej metody Z. Wusatowskiego (11 i 12) podanej w nieco odmienny sposób.

Dalsze metody podali badacze radzieccy. Należą tu w pierwszym rzędzie sposoby A. P. i A. G. Winogradowów [6], których metoda — podobnie jak Hoffa i Dahla [7] — stanowi dalsze rozwinięcie sposobu W. Dahla [3].



Rys. 4. Objaśnienie metody Lübkego przy wykroju osadczym



Rys. 5. Wykreślny sposób określania osi obojętnej

Postępuje się wówczas dla wyznaczania osi obojętnej następująco (rys. 5). Wykreśla się wykrój pomiędzy dwoma dowolnymi, równoległymi liniami $x - x$ i $y - y$. Następnie za pomocą planimetru określa się powierzchnie przekroju F_1 i F_2, przy czym

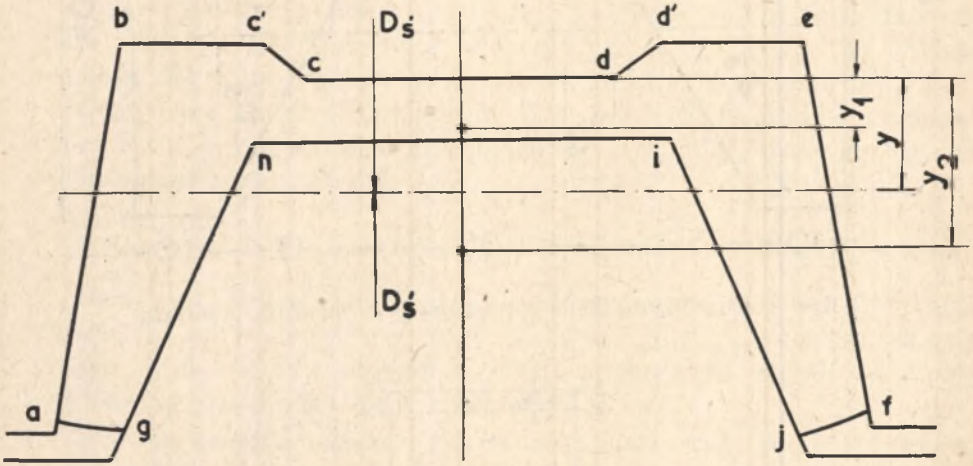
$$F_1 = B\frac{D_m}{2} \quad \text{oraz} \quad F_2 = B\frac{D'_m}{2}, \tag{5}$$

a stąd otrzymamy:

$$D_m = \frac{2F_1}{B} \quad \text{oraz} \quad D'_m = \frac{2F_2}{B}.$$

Trzeba więc dobrać D_m równe D'_m.

Jeżeli $D_m - D'_m = u$, wtedy powierzchnię F_2 powiększamy o prostokąt szerokości B i wysokości u. Dzielimy następnie odległość pomiędzy liniami y — y oraz z — z na pół i otrzymamy linię M — M. Dzieli ona wykrój na dwie jednakowe powierzchnie, a linia M — M stanowi właśnie jego oś obojętną.



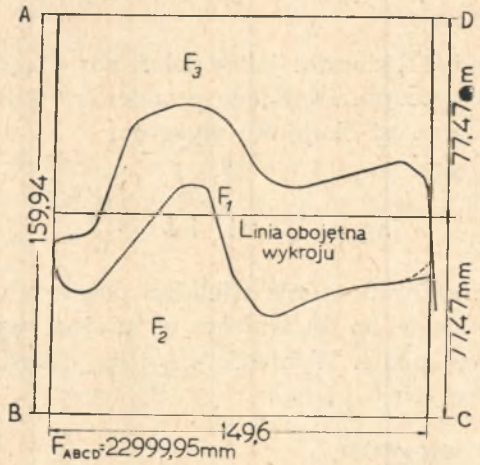
Rys. 6. Objaśnienie metody Bachtinowa i Szternowa

W. Bachtinow i M. Szternow [8] podają nieco odmienny sposób. Jeśli mamy wytoczony wykrój, jak na rys. 6, to wtedy wyznacza oś obojętną środek ciężkości obrysia górnego walca (a więc linie a, b, c, c d d' e f, jako y_1 oraz środek ciężkości obrysia dolnego walca, g, h i j jako y_2. Nie podają jednak autorzy sposobu, w jaki to należy wykonać. Następnie dzielą odległość

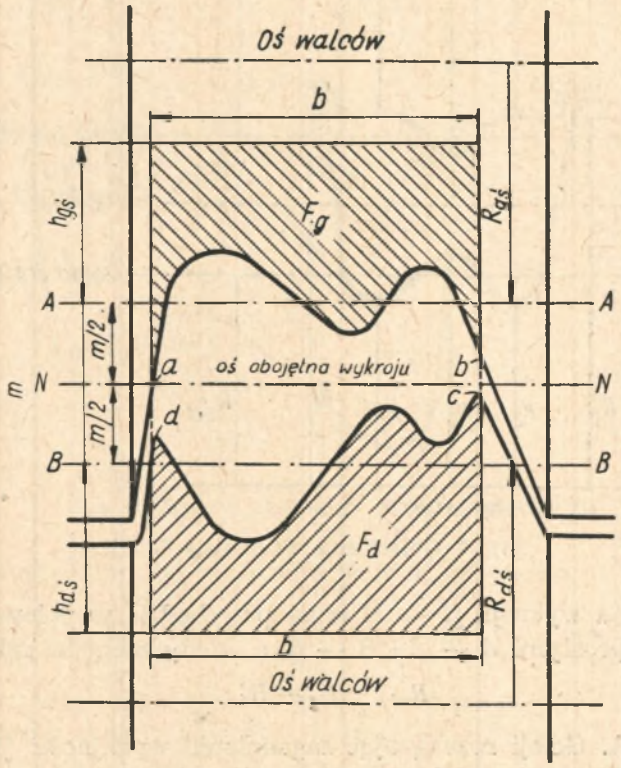
$$y = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

i stąd otrzymują położenie osi obojętnej dla całego wykroju.

Robinson i Lugar podają sposób Lennoxa [9] w zastosowaniu do kształtowników. Stanowi on także modyfikację sposobu W. Dahla [3]. Jeśli planimetrowana powierzchnia przekroju $= F_1$, (rys. 7), to należy do niej dodać powierzchnię F_2, której szerokość musi odpowiadać największej szerokości profilu F_1. Następnie przez planimetrowanie dodaje się pole F_3 po drugiej stronie tak, aby $F_2 = F_3$. Zamieniamy je na prostokąt, którego wysokość otrzymuje się przez podzielenie powierzchni pola całkowitego przez szerokość.



Rys. 7. Sposób wyznaczania w metodzie Lennoxa



Rys. 8. Wyznaczanie średnic i osi obojętnej wg Geleji

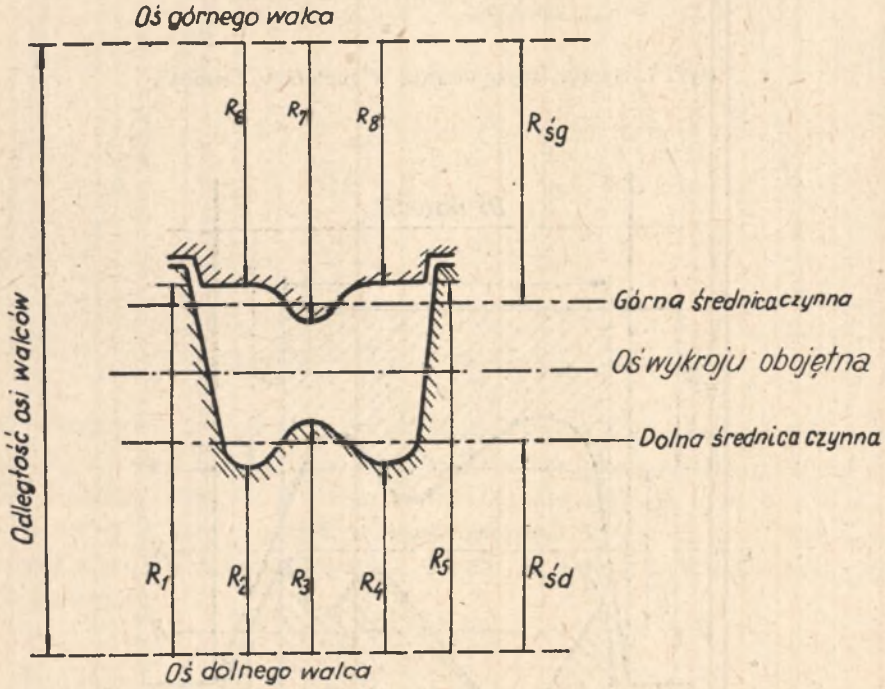
Następnie dzieli się otrzymaną wysokość na pół i otrzymuje oś obojętną wykroju.

Metoda A. Geleji [11] stanowi jakby dalsze rozwinięcie poprzedniej [10]. Polega ona na wyznaczaniu średniego promienia czynnego walca dolnego i górnego (rys. 8) oraz osi obojętnej wykroju.

Wyrazimy najpierw:

$$h_{śg} = \frac{F_g}{b} \quad \text{i} \quad h_{śd} = \frac{F_d}{b}, \tag{6}$$

gdzie F_g i F_d są dwiema dowolnie wielkimi powierzchniami, których bok tworzą dwie równoległe do osi walców w miejscu wypełnienia wykroju i dwie do nich prostopadłe. Wysokości $h_{śg}$ i $h_{śd}$ określają położenie średnich promieni czynnych $R_{śg}$ i $R_{śd}$.



Rys. 9. Objaśnienie do metody Geleji

Oś obojętna wykroju N — N musi przechodzić w połowie odległości m pomiędzy prostymi A — A i B — B, a wtedy zachodzi zależność:

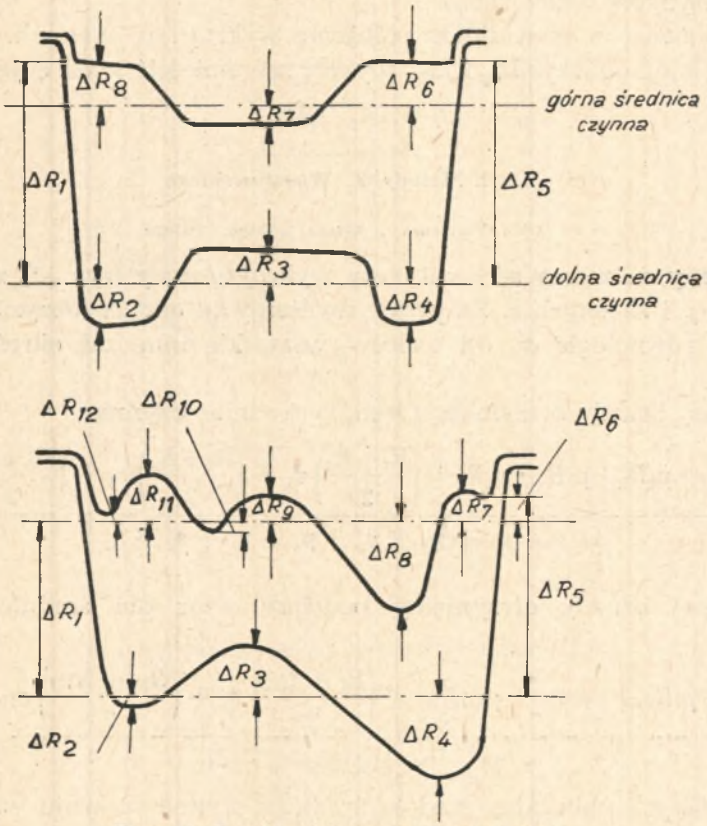
$$R_{śd} = R_{śg} = R_ś \tag{7}$$

Również A. Geleji rozwiązując zagadnienie wydajności [10] otrzymał wzory, które można by wykorzystać przy kalibrowaniu.

Jeżeli walcuje się kształtownik, jak na rys. 9, to profil wychodzi z wykroju z pewną średnią szybkością.

$$v'_{ś} = R_{ś} \frac{\pi n}{30}$$

Pomiędzy tą średnią szybkością a rzeczywistą szybkością jakiegoś punktu na obwodzie walca v_2 powstaje poślizg, który wywołuje dodatkowe tarcie wzdłuż obrysia wykroju.



Rys. 10. Sposób obliczania R wg Geleji

Tę szybkość poślizgu można wyznaczyć następująco:

$$v_{ri} = v_i - v_{ś} = R_i \frac{\pi n}{30} - R_{ś} \frac{\pi n}{30} = (R_i - R_{ś}) \frac{\pi n}{30} = \Delta R_i \frac{\pi n}{30} \qquad (8)$$

Jeśli obliczymy względną szybkość poślizgu każdego punktu i średnią dla całego wykroju, wtedy zagadnienie staje się rozwiązane.

Dla obliczania tej wielkości nie wyznacza Geleji poszczególnych promieni, lecz oblicza poszczególne różnice promieni w stosunku do górnej

średnicy czynnej i dolnej średnicy czynnej jako ΔR_i. W każdym przypadku sposób wyznaczania ΔR_i objaśnia rysunek 10.

Dla całego wykroju średnią szybkość poślizgu można obliczyć wzorami:

$$v_m = \frac{\pi n}{30} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{x} \Delta R_i}{2 \cdot x}, \tag{9}$$

gdzie x oznacza ilość różnic ΔR_i w średnicach walców powodujących średnią szybkość walcowania.

Jeśli chodzi o prawidłowe położenie wykroju w walcach, to proponuje A. Geleji obliczyć $D_{śg}$ i $D_{śd}$, wykrój zaś umieścić w tej odległości, aby

$$D_ś = D_{śg} = D_{śd} \tag{10}$$

2. 4. Metody Z. Wusatowskiego

2.4.1. Pierwsza i druga metoda autora

Załóżmy, że mamy schematyczny wykrój złożony (rys. 11) z odcinków prostych p i skośnych s. Za proste uważamy te odcinki obrysia wykroju, które są równoległe do osi walców, wszystkie inne zaś określamy jako skośne.

Dla górnej bruzdy otrzymamy średnią średnicę czynną:

$$R_{śg} = \frac{p_1R_1 + p_2R_2 + p_3R_3 + p_4R_4 + \left(\frac{R_1+R_2}{2}\right)s_1 + \left(\frac{R_2+R_3}{2}\right)s_2 + \left(\frac{R_3+R_4}{2}\right)s_3}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + s_1 + s_2 + s_3} \text{ mm} \tag{11}$$

Dla dolnej bruzdy otrzymamy podobny wzór dla średniej średnicy czynnej:

$$R_{śd} = \frac{p_{I}R_{I} + p_{II}R_{II} + p_{III}R_{III} + \left(\frac{R_{I} + R_{II}}{2}\right)s_{I} + \left(\frac{R_{II} + R_{III}}{2}\right)s_{II}}{p_{I} + p_{II} + p_{III} + s_{I} + s_{II}} \text{ mm} \tag{12}$$

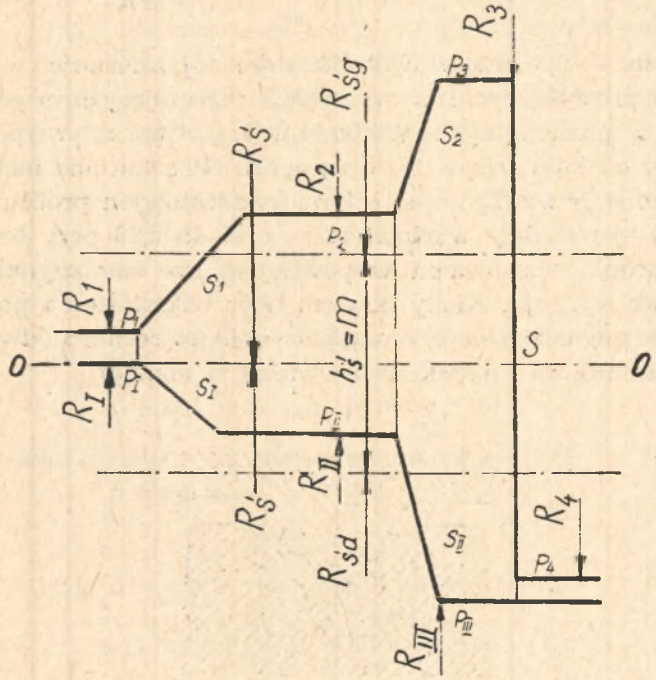
Z tych danych obliczamy średnią średnicę czynną wykroju wzorem:

$$R_{ś\ wykr} = R_{śg} = R_{sd}; \text{ mm} \tag{13}$$

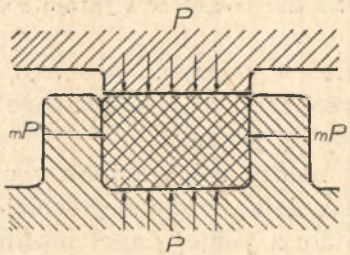
Wzory (11 do 13) obowiązują przy założeniu, że nacisk jest równomierny w każdej części bruzdy.

Dla otrzymania zależności (13) musimy tak umieścić oś obojętną wykroju, aby średnia szybkość wyjściowa górnej bruzdy była taka sama jak dolnej. Jest to tylko wtedy możliwe, jeśli odległość pomiędzy obu promieniami czynnymi $R_{śd}$ i $R_{śg} = h_ś$ (rys. 11) podzielimy na pół, a więc $\frac{m}{}$. W tej odległości należy umieścić oś obojętną wykroju $O - O$.

Rozpatrzmy przypadek, w którym występuje nierównomierny nacisk w różnych częściach wykroju. Jeżeli profil przedstawiony na rysunku 12 ściska siła P, to metal naciska na ścianki boczne wykroju z siłą mP, gdzie m jest współczynnikiem. Dolną granicą współczynnika m jest zero dla tych wszystkich wykrojów, których szerokość jest większa od szero-



Rys. 11. Rysunek schematyczny do metod autora

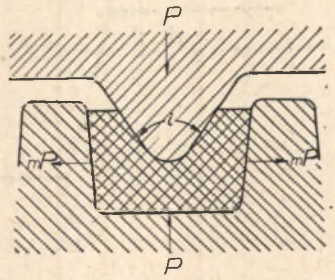


Rys. 12. Ściskanie pręta przy ograniczonym roztłoczeniu

kości pręta po przepuście, a więc wszędzie tam, gdzie boki pręta nie stykają się lub prawie nie stykają się z bocznymi ściankami wykroju. Boczne naciski mP osiągają swe maksimum, jeśli rzeczywiste roztłoczenie jest całkowicie ograniczone, to znaczy ujęte przez ścianki boczne wykroju. Według Trinksa [14] w takim przypadku m może wynosić 0,3, czyli nacisk

na ścianki boczne wykroju dochodzi do 30% wartości nacisku sił pionowych. Przy kalibrowaniu można przyjąć średnio m jako równe 0,25. Bardziej celowe wydaje się dokładniejsze obliczenie m jako stosunek ilości metalu, który ulega roztłoczeniu, do ilości metalu wypchniętego przez gniot. Najprościej można to wyrazić stosunkiem $\frac{\Delta b}{\Delta h}$ dla wykrojów prostokątnych.

Wartość $m = 0{,}3$ przedstawia charakter tej zależności w wykrojach zamkniętych prostokątnych. W wykrojach rozcinających m jest znacznie większe niż w prostokątnych. Wielkość, którą w takim przypadku zakładamy, zależy od kąta i (rys. 13) oraz oporu odkształcenia metalu. Próby przeprowadzone przez Trinksa [14] na kwadratowym profilu wstępnym przy kącie $i = 60°$ dały wartości $m = 0{,}45$ do 0,60 przy temperaturze 1200 °C. Warunki walcowania w pewnej mierze samoczynnie regulują boczny nacisk wykroju. Kiedy bowiem opór odkształcenia pręta maleje, wtedy nacisk również maleje, a współczynnik m rośnie i odwrotnie, kiedy opór odkształcenia i nacisk rosną, wtedy m maleje.



Rys. 13. Naciski boczne w wykroju rozcinające

Ponieważ współczynnik m zależy od stosunku ilości metalu wypchniętego przez gniot do ilości metalu przesuwanego przy roztłoczeniu, jest on więc zawsze mniejszy od jedności.

Dla kształtowników należy założyć inne wartości, ponieważ w wykroju następuje zmniejszenie bezwzględnego roztłoczenia, na skutek przepłynięcia nadmiaru metalu z jednej części profilu do drugiej.

Również inaczej przebiegają zjawiska w części otwartej wykroju, gdzie można stosować gniot pionowy i boczny, niż w części zamkniętej wykroju, gdzie można stosować tylko gniot pionowy.

Przy walcowaniu w wykrojach rozcinających należy stosować wartości podane przez Trinksa [14].

Jeżeli naciski w wykroju nie rozkładają się równomiernie, to przy stałym współczynniku tarcia f w pewnych miejscach wykroju na odcin-

kach prostych występuje siła tarcia $T = f \cdot P$, na odcinkach skośnych, gdzie mamy roztłoczenie metalu, działa siła $T_1 = m \cdot f \cdot P$, przy czym m jest funkcją $\frac{\Delta b}{\Delta h}$.

Przypuśćmy więc, że na rys. 11 na odcinkach prostych p działa nacisk P, na odcinkach zaś skośnych wykroju s działa nacisk mP oraz że iloczyn $P \cdot f$ ma wartość stałą i uprości się w liczniku i mianowniku, to wtedy w przypadku stałego współczynnika m dla całego wykroju (rys. 11) wzory (11 do 13) przybiorą następującą postać:

$$R_{śg} = \frac{p_1R_1 + p_2R_2 + p_3R_3 + p_4R_4 + \frac{m}{2}[(R_1+R_2)s_1 + (R_2+R_3)s_2 + (R_3+R_4)s_3]}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + m(s_1 + s_2 + s_3)} \text{ mm} \quad (11a)$$

$$R_{śd} = \frac{p_{I}R_{I} + p_{II}R_{II} + p_{III}R_{III} + \frac{m}{2}[(R_{I} + R_{II})s_{I} + (R_{II} + R_{III})s_{II}]}{p_{I} + p_{II} + p_{III} + m(s_{I} + s_{II})} \text{ mm} \quad (12a)$$

Jeżeli współczynniki m są różne w poszczególnych częściach wykroju, należy stosować wzory:

$$R_{śg} = \frac{p_1R_1 + p_2R_2 + p_3R_3 + p_4R_4 + \frac{1}{2}[(R_1+R_2)s_1m_1 + (R_2+R_3)s_2m_2 + (R_3+R_4)s_3m_3}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + m_1s_1 + m_2s_2 + s_3m_3} \text{ mm} \quad 11b$$

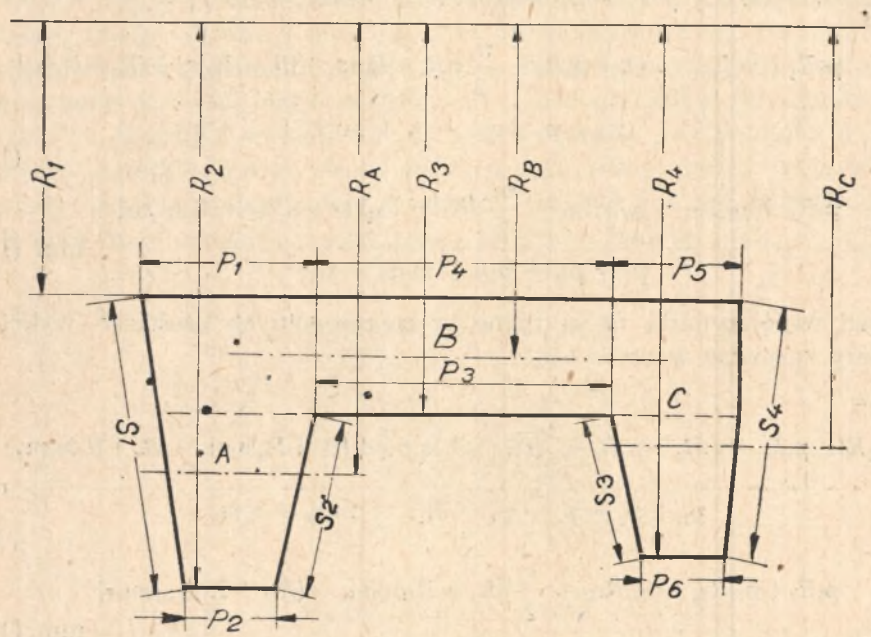
$$R_{śd} = \frac{p_{I}R_{I} + p_{II}R_{II} + p_{III}R_{III} + \frac{1}{2}[(R_{I} + R_{II})s_{I}m_{I} + (R_{II} + R_{III})s_{II}m_{II}]}{p_{I} + p_{II} + p_{III} + s_{I}m_{I} + s_{II}m_{II}} \text{ mm} \quad (12b)$$

Stosując te wzory otrzymamy różne wielkości średnich promieni czynnych $R_{śg}$ i $R_{śd}$ w stosunku do wzorów (11 do 12). Dla prawidłowego ułożenia wykroju musi być spełniona także zależność (13), po przedstawieniu nowych wartości w zależności (11 a i 12 a) lub (11 b i 12 b) umieścimy wtedy oś obojętną dzieląc odcinek $m = h_ś$ pomiędzy tymi nowymi promieniami czynnymi na pół.

2.4.2 Trzecia metoda autora [12]

Najwłaściwsza byłaby taka metoda, która by uwzględniała wpływ różnych długości odcinków oraz o ile możności różnych nacisków spowodowanych gniotem na tych odcinkach dla określenia położenia osi obojętnej wykroju.

Przy tym sposobie wyznaczania osi obojętnej wykroju należy uwzględnić kształt wykroju wychodzącego i wyciągnąć z tego odpowiednie wnioski. Jeśli na przykład gniot jest równomiernie rozłożony na całym przekroju w wykroju otwartym, wówczas umieszczamy oś obojętną w środku ciężkości takiego wykroju. Przy nierównomiernych gniotach należy obniżyć lub podwyższyć wykrój, aby otrzymać równe średnie średnice czynne bruzd oraz ich szybkości wyjściowe. Jeśliby w profilu tylko stopki otrzymywały gniot boczny, wtedy oś obojętną umieścilibyśmy mniej więcej w połowie wysokości ściskanej stopki.



Rys. 14. Rysunek objaśniający 3 metodę autora

Natomiast przy gniocie tylko w środniku oś obojętną umieścilibyśmy w pobliżu połowy wysokości środnika. Im większy gniot otrzymają stopki w stosunku do środnika, tym bardziej powinna być przesunięta oś obojętna wykroju w kierunku elementu, na który działa większy gniot, a więc ku stopkom. Odwrotnie, jeśli środnik otrzymuje większy gniot niż stopki, wtedy oś obojętna wykroju musi leżeć bliżej środnika.

Również nie jest obojętne, czy gniot odbywa się w części otwartej, czy w części zamkniętej wykroju ze względu na charakter gniotu, lecz zagadnienia tego nie potrafimy jeszcze właściwie rozwiązać.

Spróbujemy dotychczasowe wywody ująć matematycznie, co by ułatwiło nam praktyczne rozwiązanie tego zagadnienia. Jeśli założymy, że

przy walcowaniu na gorąco przywieranie metalu do powierzchni walców zachodzi prawie aż do wylotu z walców, czyli przesuwanie cząstek metalu zachodzi głównie w drodze wewnętrznego przemieszczenia, to współczynnik tarcia na powierzchni nie wchodzi w rachubę. Wolno go przyjąć za stały, a więc bez wpływu na nasze wywody. Można wówczas obliczyć oś obojętną lub średni promień czynny całego wykroju w sposób następujący:

Dzielimy profil lub wykrój na proste elementy składowe, a więc stopkę, szyjkę, środnik, główkę, ramię itp. Obliczamy średni promień czynny każdej części składowej wykroju osobno. Otrzymamy w ten sposób oś obojętną tejże części wykroju (rys. 14).

Układamy ten wykrój tak, jak będzie wytoczony na walcach, i kreślimy dowolną prostą $a - b$, w stosunku do której będziemy obliczać wszystkie średnice.

Dzielimy wykrój na trzy oddzielne pola A, B i C. Sposób podziału naznaczony jest cienką linią. Można również oddzielić wykrój, jak zaznaczono linią przerywaną, lecz to zależy od wybranej uprzednio metody walcowania.

Nie uwzględniając różnicy nacisku na poszczególnych ściankach otrzymujemy według wzoru (11).

$$R_A = \frac{p_1 R_1 + p_2 R_2 + s_1 \left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right) + s_2 \left(\frac{R_2 + R_3}{2}\right)}{p_1 + p_2 + s_1 + s_2} \text{ mm} \tag{14}$$

$$R_B = \frac{p_3 \cdot R_3 + p_4 \cdot R_1}{p_3 + p_4} \text{ mm} \tag{15}$$

$$R_C = \frac{p_6 \cdot R_4 + p_5 \cdot R_1 + s_3 \left(\frac{R_3 + R_4}{2}\right) + s_4 \left(\frac{R_4 + R_1}{2}\right)}{p_6 + p_5 + s_3 + s_4} \text{ mm} \tag{16}$$

Wtedy R_A, R_B i R_C są średnimi promieniami czynnymi odpowiednich pól, na które podzielimy wykrój. Z wartości tych obliczymy oś obojętną wykroju jako jego średni promień czynny według wzoru

$$R_{\acute{s}} = \frac{F_{A2} \cdot \lambda_A \cdot R_A + F_{B2} \cdot \lambda_B \cdot R_B + F_{C2}\, \lambda_C \cdot R_C}{(F_{A2} + F_{B2} + F_{C2}) \cdot \lambda_{\acute{s}}} \text{ mm} \tag{17}$$

gdzie:

F_{A2}, F_{B2} i F_{C2} — powierzchnie części A, B, C wykroju,

λ_A, λ_B, λ_C — współczynnik wydłużenia części A, B i C wykroju,

$\lambda_{\acute{s}}$ — współczynnik średniego wydłużenia całego wykroju $= \frac{F_1}{F_2}$

2.4.3. Czwarta metoda autora

Wyprowadzone dotychczas przez autora metody nie uwzględniają nierównomiernego przepływu metalu przy walcowaniu. Z tego powodu można stosować je w przepustach końcowych, gdzie te zjawiska celowo się ogranicza, natomiast w wykrojach wstępnych mogą zajść bardzo duże różnice wywołane przepływaniem.

Z tego powodu autor przeprowadził jeszcze jedną próbę prawidłowego rozwiązania tego zagadnienia. Ponieważ jest to metoda nowa, dlatego wymaga ona szczegółowego podania wywodów.

Przypuśćmy, że profil złożony z części A i B (rys. 15) wchodzi do walców o przekroju $F_1 = F_{A1} + F_{B1}$, wychodzi zaś o przekroju $F_2 = F_{A2} + F_{B2}$. Równocześnie pewna ilość metalu o powierzchni F_x przepływa z części A do B. Równanie dla płaszczyzny wyjściowej przedstawia się dla profilu złożonego z dwu części następująco:

$$F_{A2} \cdot R_A \cdot \lambda_A + F_{B2} \cdot R_B \cdot \lambda_B = (F_{A2} + F_{B2}) R_ś \cdot \lambda_ś. \tag{17 a}$$

Zmiany obrazujące przepływanie metalu w czasie walcowania są następujące:

$$\begin{aligned} F_{A1} &= F_{A2} \pm F_x \lambda_ś \\ F_{B1} &= F_{B2} \mp F_x \lambda_ś, \end{aligned} \tag{18}$$

gdzie: F_x wyznaczamy ze wzoru Góreckiego [15]

$$F_x = F_{A2}\left(\frac{\lambda_A}{\lambda_ś} - 1\right) \tag{19a}$$

lub

$$F_x = F_{B2}\left(1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_ś}\right). \tag{19b}$$

Natomiast

$$F_{A2} = \frac{F_{A1}}{\lambda_A} \tag{20}$$

oraz

$$F_{B2} = \frac{F_{B_1}}{\lambda_B}.$$

We wzorze (18) $\lambda_ś$ określamy jako $\lambda_ś = \frac{F_1}{F_2}$.

Również dla płaszczyzny wyjściowej możemy napisać zależność:

$$\begin{aligned} F_{A2\ rz} &= F_{A2} \pm F_x \\ F_{B2\ rz} &= F_{B2} \mp F_x \end{aligned} \tag{21}$$

Przekształcając wzór (17 a) i uwzględniając (20) otrzymamy:

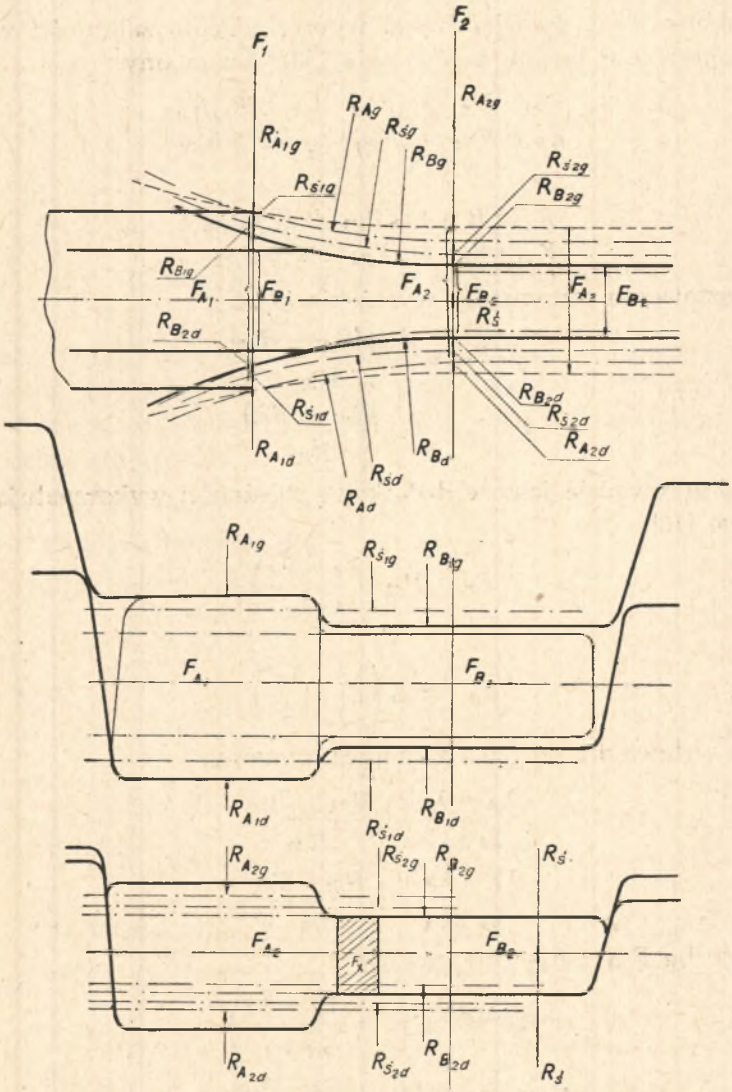
$$\begin{aligned} F_1 \cdot R_ś &= F_{A1} \cdot R_{A2} + F_{B1} \cdot R_{B2} = (F_{A2} + F_{B2}) \lambda_ś \cdot R_ś = \\ &= F_{A2} \cdot \lambda_A \cdot R_{A2} + F_{B2} \cdot \lambda_B \cdot R_{B2} \end{aligned} \tag{17 b}$$

Przeanalizujemy otrzymane zależności.
Jeśli $\lambda_A = 1$, to $F_{A2} = F_{A1}$.
Wtedy:

$$\frac{F_{A_1} \cdot R_{A_2} + F_{B_2} \cdot R_{B_2} \cdot \lambda_B}{(F_{A_1} + F_{B_2})\ R_{\acute{s}}} = \lambda_{\acute{s}}$$

Wynika stąd, że R_{A2} nie może być równe 0, a wtedy:

$$R_{B2} = R_{A2} = R_{\acute{s}}$$



Rys. 15. Rysunek do 4 metody autora

Podstawiając przyjęte zależności otrzymamy:

$$\frac{F_{A1} + F_{B2} \cdot \lambda_B}{F_{A1} + F_{B2}} = 1 + \frac{F_{B2} \cdot \lambda_B}{F_{A1} + F_{B2}} = \lambda_{ś}. \tag{22}$$

Przyjęcie było więc słuszne.

Spróbujmy napisać analogiczne równanie jak (17 b) dla płaszczyzny wejściowej F_1 oraz dla płaszczyzny wyjściowej:

$$F_1 \cdot R_{ś} = F_{A1} R_{A1} + F_{B1} R_{B1} = (F_{A2} + F_{B2}) \lambda_{ś} \cdot R_{ś} =$$
$$= (F_{A2} \cdot \lambda_A \pm F_x) R_{A2} + (F_{B2} \lambda_B \mp F_x) R_{B2} \tag{23}$$

Przejdźmy teraz do właściwego wyprowadzenia zależności wyrażających przepływanie metalu z równania (23) otrzymamy:

$$F_{A1} \cdot R_{A1} = (F_{A2} \cdot \lambda_A \pm F_x) R_{A2}$$
$$F_{B1} \cdot R_{B1} = (F_{B2} \cdot \lambda_B \mp F_x) R_{B2}$$

a stąd:

$$F_{A1} \cdot R_{A1} = (F_{A1} \pm F_x) R_{A2}$$
$$F_{B1} \cdot R_{B1} = (F_{B1} \mp F_x) R_{B2} \tag{24}$$

Po przekształceniu otrzymamy wyrażenia dla F_x:

$$\mp F_x = \frac{F_{A1} (R_{A1} - R_{A2})}{R_{A2}} \tag{25a}$$

$$\pm F_x = F_{B1} \frac{(R_{B1} - R_{B2})}{R_{B2}} \tag{25b}$$

Możemy wyprowadzić jeszcze dodatkowe zależności wykorzystując wzory Góreckiego [13].

$$F_x = F_{A1} \left(\frac{\lambda_A - \lambda_{ś}}{\lambda_{ś} \lambda_B} \right) \tag{26}$$

oraz

$$F_x = F_{B1} \left(\frac{\lambda_{ś} - \lambda_B}{\lambda_{ś} \lambda_B} \right) \tag{27}$$

a stąd po wstawieniu do (25 a i 25 b) otrzymamy:

$$\frac{\lambda_A - \lambda_{ś}}{\lambda_{ś} \lambda_A} = \frac{R_{A1} - R_{A2}}{R_{A2}} \tag{28a}$$

$$\frac{\lambda_{ś} - \lambda_B}{\lambda_{ś} \lambda_B} = \frac{R_{B1} - R_{B2}}{R_{B1}} \tag{28b}$$

rozwiązując na R_{A1} i R_{B1} otrzymamy:

$$R_{A1} = R_{A2} \left(1 + \frac{\lambda_A - \lambda_{ś}}{\lambda_{ś} \lambda_A} \right) \tag{29}$$

$$R_{B1} = R_{B2} \left(1 + \frac{\lambda_{ś} - \lambda_B}{\lambda_{ś} \lambda_B} \right) \tag{30}$$

Przekształcając otrzymane nowe wzory, które uwzględniają wpływ przepływania metalu na średnie średnice czynne danego elementu przy walcowaniu kształtowników:

$$R_{A2} = \frac{R_{A1}}{\left(1 + \frac{\lambda_A - \lambda_{\acute{s}}}{\lambda_{\acute{s}}\ \lambda_A}\right)} \tag{31}$$

$$R_{B2} = \frac{R_{B1}}{\left(1 + \frac{\lambda_{\acute{s}} - \lambda_B}{\lambda_{\acute{s}}\ \lambda_B}\right)} \tag{32}$$

Znając R_{A2} i R_{B2} obliczone wzorami (31 do 32) obliczymy $R_{\acute{s}}$ z wzoru (17a)

$$R_{\acute{s}} = \frac{F_{A2} \cdot R_A\ \lambda_A + F_{B2}\ R_B\ \lambda_B}{(F_{A2} + F_{B2})\ \lambda_{\acute{s}}} \tag{17a}$$

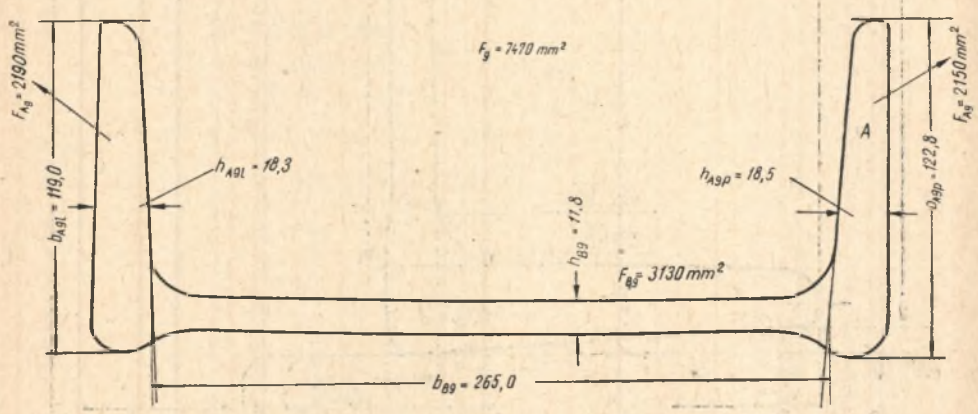
3. Próbne przeliczenia porównawcze

Do prób wzięto przepust 10 ceownika 300 mm walcowany w jednej z naszych hut. Wymiary beczki walca 2000 × średnica 835 mm. Wybrano taki profil celowo, ponieważ jest dość duży oraz łatwo na nim przeprowadzić porównanie metod.

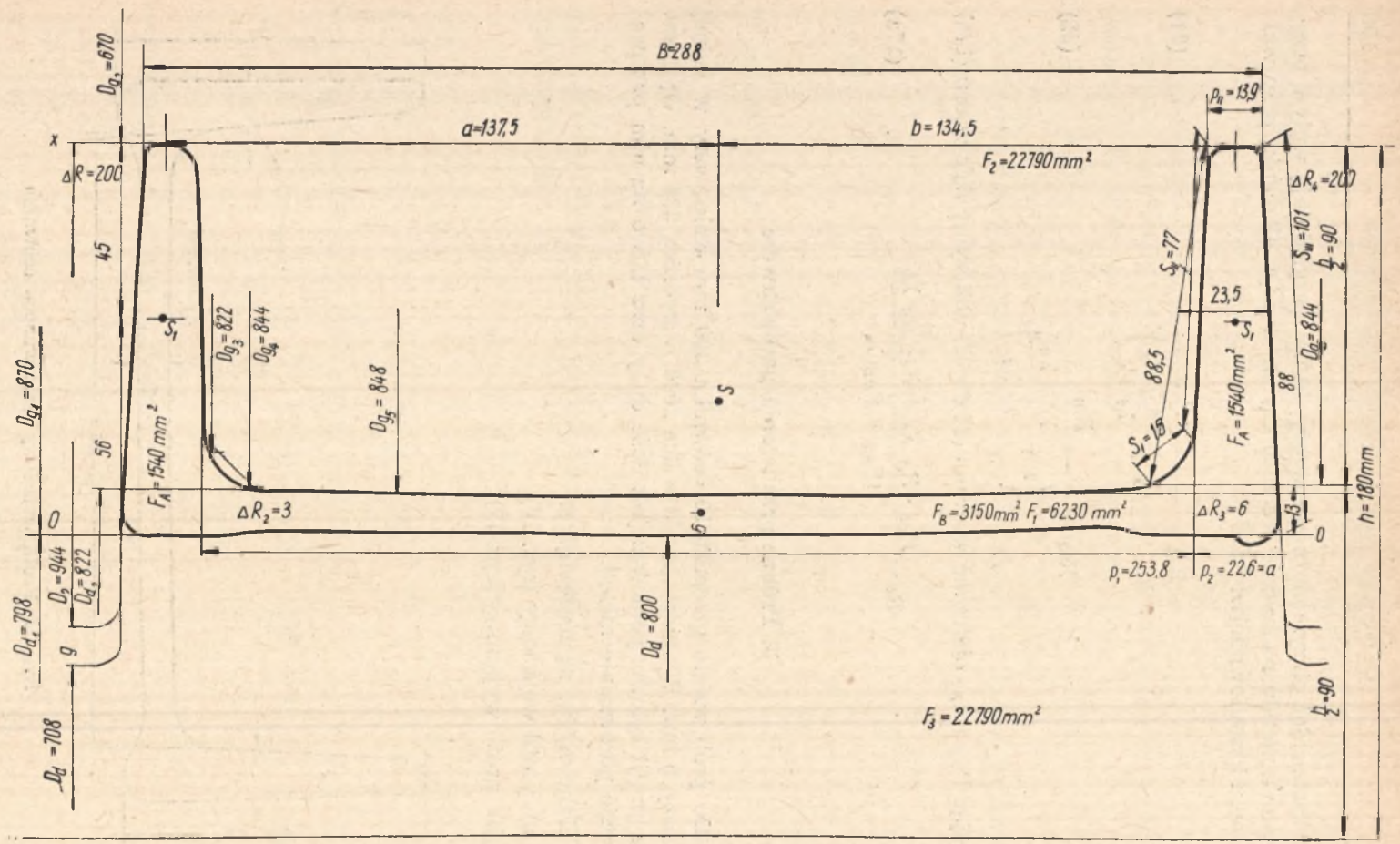
Dane ogólne są następujące:

a) profil wejściowy (rys. 16),

b) profil wyjściowy (rys. 17).



Rys. 16. Profil wejściowy walcowanego ceownika



Rys. 17. Przepust 10 walcowanego ceownika

Stopka:

F_{A9p}	= 2190	mm²	F_{A10p}	= 1840	mm²
F_{A9l}	= 2150	mm²	F_{A10l}	= 1800	mm²
F_{A9}	= 4340	mm²	F_{A10}	= 3640	mm²
h_{A9}	= 18,5	mm	h_{A10}	= 17,5	mm
b_{A9}	= 122,8	mm	b_{A10}	= 101	mm
Środnik:			λ_A	= 1,1923	
F_{B9}	= 3130	mm²	F_{B10}	= 2590	mm²
b_{B9}	= 265,0	mm	b_{B10}	= 253,0	mm
h_{B9}	= 11,8	mm	h_{B10}	= 10,0	mm
			λ_B	= 1,2085	
F_9	= 7440	mm²	F_{10}	= 6230	mm²

$$\lambda_c = \frac{F_9}{F_{10}} = \frac{7470}{6230} = 1{,}1991$$

Przeanalizujmy po kolei poszczególne metody i obliczymy, jakiej wielkości średnice otrzymamy z nich dla tego profilu. Porównanie to pozwoli ocenić lepiej wartość praktyczną poszczególnych metod.

Z metod najstarszych pominięto wszystkie inne z wyjątkiem środka ciężkości, ponieważ metody tej jeszcze się używa przy kalibrowaniu.

a) Umieszczając linię obojętną wykroju w środku ciężkości otrzymamy:

a stąd

$$x = 29{,}22 \text{ mm}$$
$$y = 20{,}3 \text{ mm}$$
$$D_o = 799{,}44 \text{ mm}$$

b) Metoda Tafla (patrz rys. 1 i wzór 1)

$$B = 288{,}0 \text{ mm}$$
$$a = 22{,}0 \text{ mm}$$
$$b = B - 2a = 288 - 45{,}2 = 242{,}8 \text{ mm}$$
$$e = e_1 + e_2 = 50{,}0 \text{ mm}$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{2a}{b} = \frac{242{,}8}{45{,}2} = 5{,}37$$

$$e_2 = 5{,}37\, e_1$$

$$e_1 + 5{,}37\, e_1 = 50$$

$$e_1 = \frac{50}{6{,}37} = 7{,}8 \text{ mm}$$

$$e_2 = 53 + e_1 = 42{,}2 \text{ mm}$$

Po wykreśleniu na rysunku 18 otrzymamy $D_0 = 842{,}7$ mm

c) Metoda Dahla (rys. 2 i wzór 4)

$$D_{śg} = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + \ldots + D_{10}}{10} =$$

$$= \frac{870 + 670 + 822 + 844 + 848 + 870 + 670 + 822 + 844 + 848}{10} = 810{,}8 \text{ mm}$$

$$D_{śd} = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4}{4} = \frac{800 + 798 + 800 + 798}{4} = 799 \text{ mm}$$

Przy podzieleniu na pół odległości otrzymamy: $D_0 = 842{,}8$ mm.

d) Metoda Benada (patrz rys. 3).

$$B = 288{,}0 \text{ mm}$$
$$c = 20{,}28 \text{ mm}$$
$$e = 50{,}0 \text{ mm}$$

$$m = \frac{B}{2c} = \frac{288{,}0}{40{,}56} = 7{,}10 \text{ mm}$$

$$w = \frac{e}{m} = \frac{55{,}0}{7{,}10} = 7{,}04 \text{ mm}$$

$$7{,}04 - 6 = 1{,}04 \text{ mm}$$
$$D_0 = 846{,}96 \text{ mm}$$

e) Metoda Lübkego (patrz rys. 3)

$$2 \cdot 101 \cdot 50{,}5 + 2 \cdot 13{,}9 \cdot 101 + 233 \cdot 10 + 2 \cdot 77 \cdot 61 + 2 \cdot 15 \cdot 17$$
$$= 2 \cdot 101 + 2 \cdot 13{,}9 + 2 \cdot 15 + 2 \cdot 77 + 233\ e_2$$

a stąd

$$e_2 = \frac{25242{,}8}{646{,}8} = 39{,}03 \text{ mm}$$

$$e_1 = \frac{e_2}{2} = \frac{39{,}03}{2} = 19{,}515 \text{ mm}$$

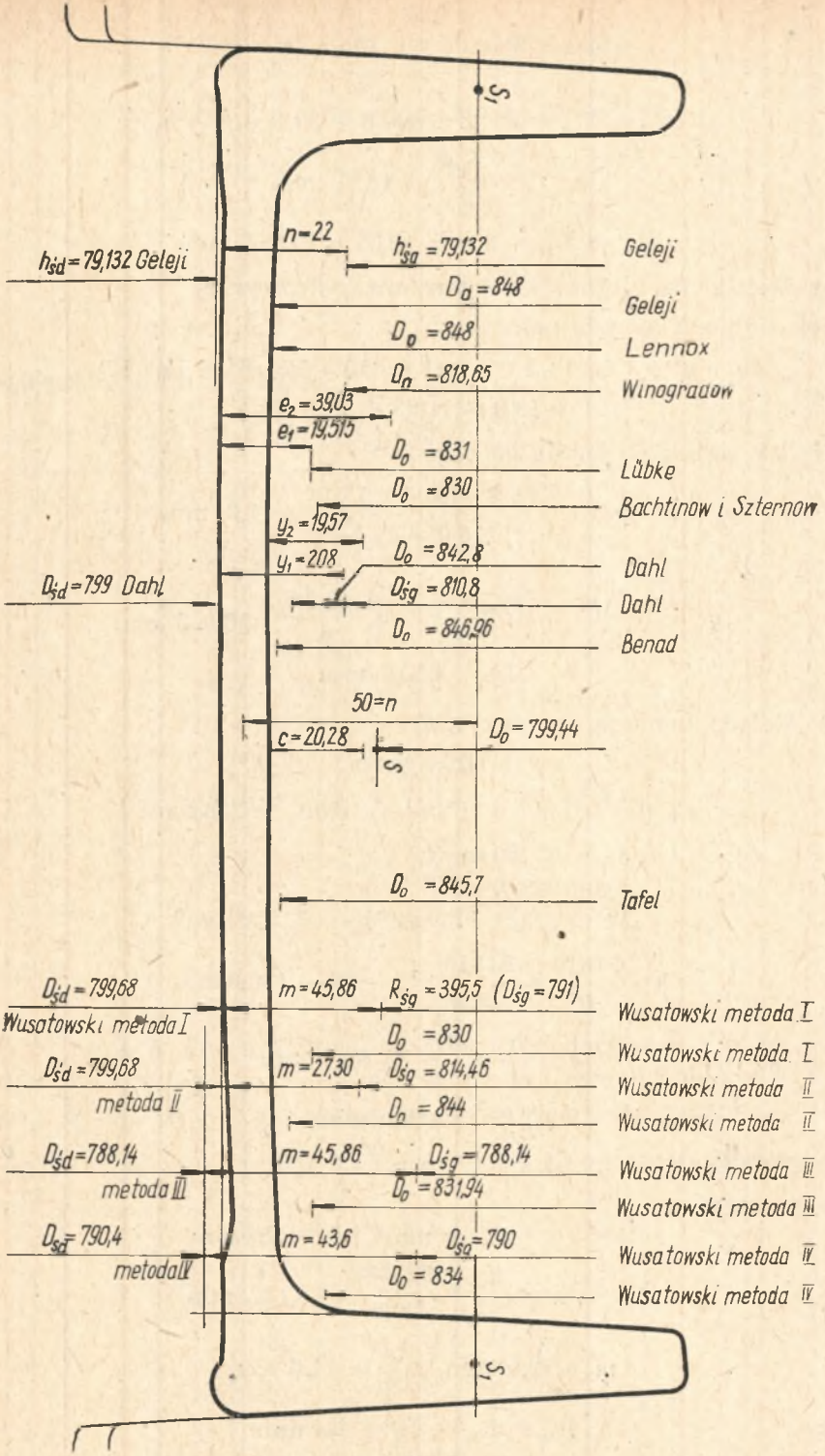
$$D_ś = 831{,}0 \text{ mm}$$

g) Metoda Dahla — Winogradowów (patrz rys. 4 i wzór 5)

$$B = 288{,}0 \text{ mm}$$
$$F_{1w} = 1205{,}72 \text{ mm}^2$$
$$F_{2w} = 115200 \text{ mm}^2$$

$$D_m = \frac{2F_{1w}}{B} = \frac{2 \cdot 120572}{288{,}0} = 837{,}3 \text{ mm}$$

$$D'_m = \frac{2F_{2w}}{B} = \frac{2 \cdot 115200}{288{,}0} = 800{,}0 \text{ mm}$$



Rys. 18. Przepust 10 z naniesionymi obliczonymi średnicami i osiami obojętnymi

$$D_m - D'_m = 837{,}3 - 800{,}0 = 37{,}3 \text{ mm} = n$$

$$\frac{n}{2} = \frac{37{,}3}{2} = 16{,}66 \text{ mm}$$

$$D_m = D'_m = 800 + 18{,}65 = 818{,}65 \text{ mm.}$$

h) Metoda Bachtinowa — Szternowa (patrz rys. 5)

Środek ciężkości obrysia dolnego:

$$\acute{s} = y_1 = \frac{101 \cdot 50{,}5 + 13{,}9 \cdot 101 + 116{,}5 \cdot 10 + 77 \cdot 61 + 15 \cdot 17}{101 + 13{,}9 + 11{,}65 + 77 + 15} = 39{,}03 \text{ mm}$$

Środek ciężkości obrysia górnego:

$$s = y_2 = \frac{126{,}9 \cdot 1{,}0 + 10 \cdot 1}{126{,}9 + 10} = 1{,}0 \text{ mm}$$

a stąd:

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{39{,}03 + 1}{2} = \frac{40{,}03}{2} = 20{,}015 \text{ mm}$$

$$D_0 = 830{,}0 \text{ mm}$$

i) Metoda Lannoxa (patrz rys. 6)

$$B = 288{,}0$$

$$F_1 \text{ (wykroju)} = 3150 + 2 \cdot 1540 = 6230 \text{ mm}^2$$

$$F_2 = 22790 \text{ mm}^2$$

$$F_3 = 22790 \text{ mm}^2$$

$$Fc = 62307 + 2 \cdot 22790 = 51810 \text{ mm}^2$$

$$h = \frac{51810}{B} = \frac{51810}{288{,}0} = 179{,}89 \sim 180{,}0 \text{ mm}$$

$$e = \frac{h}{2} = \frac{180}{2} = 90{,}0 \text{ mm}$$

$$D_0 = 848{,}0 \text{ mm}$$

j) Metoda Geleji (patrz rys. 7 i wzory 6 i 7)

Przyjmujemy:

$$F_g = F_d = 22790 \text{ mm}^2 \quad B = 288 \text{ mm}$$

$$h_{śg} = h_{śd} = \frac{F_g}{B} = \frac{22790}{288} = 79{,}132 \text{ mm}$$

$$m = 22{,}0 \text{ mm}, \quad \frac{m}{2} = 11{,}0 \text{ mm}$$

$$R_{śg} = R_{śd} = R_ś = 424 \text{ mm}$$

$$D_0 = 848 \text{ mm.}$$

k) I Metoda autora (patrz rys. 11 i wzory 11 do 13)

$$R_{śg} = \frac{p_1R_1 + p_2R_2 + p_3R_3 + \left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right) s_1 + \left(\frac{R_3 + R_4}{2}\right) s_2}{p_1 + p_2 + p_3 + s_1 + s_2}$$

$$R_{śd} = \frac{p_{\mathrm{I}} \cdot R_{\mathrm{I}} + p_{\mathrm{II}}R_{\mathrm{II}} + \left(\frac{R_{\mathrm{I}} + R_{\mathrm{II}}}{2}\right) s_{\mathrm{I}}}{p_{\mathrm{I}} + p_{\mathrm{II}} + s_{\mathrm{I}}}$$

po podstawieniu otrzymamy:

$$R_{śg} = \frac{233 \cdot 424 + 2 \cdot 13{,}9 \cdot 335 + 2 \cdot 15 \left(\frac{422+411}{2}\right) + 2 \cdot 77 \left(\frac{411+335}{2}\right)}{233 + 27{,}8 + 30 + 154 + 202} +$$

$$+ \frac{2 \cdot 101 \left(\frac{437 + 335}{2}\right)}{233 + 27{,}8 + 30 + 154 + 202} = 395{,}5 \text{ mm}$$

$$D_{śg} = 2 \cdot R_{śg} = 2 \cdot 395{,}5 = 791 \text{ mm}$$

$$R_{śd} = \frac{253{,}8 \cdot 400 + 2 \cdot 22{,}6 \cdot 399}{253{,}8 + 45{,}2} = 399{,}84 \text{ mm}$$

$$D_{śd} = 2 \cdot R_{śd} = 799{,}68 \text{ mm}$$

$$R_{śg} + R_{śd} = 791 + 799{,}68 = 1590{,}68 \text{ mm.}$$

Wobec tego:

$$m = 39{,}66$$

$$\frac{m}{2} = 19{,}83,$$

a stąd:

$$D_0 = 830 \text{ mm}$$

l) II Metoda autora (wzory 11 a do 12 a) polega na wprowadzeniu współczynników tarcia na odcinkach skośnych, zgodnie z tablicą 2 przyjmujemy tę wartość $f = 0{,}2$, wtedy po podstawieniu otrzymamy:

$$R_{śg} = \frac{233 \cdot 424 + 2 \cdot 13{,}9 \cdot 335 + \frac{0{,}2}{2} [(422 + 411)\, 2 \cdot 15 + 2 \cdot 77\, (411 + 335)}{233 + 27{,}8 + 0{,}2\,(30 + 154 + 202)} +$$

$$+ \frac{2 \cdot 101\,(437 + 335)]}{233 + 27{,}8 + 0{,}2\,(30 + 154 + 202)} = 407{,}23 \text{ mm}$$

$$D_{śg} = 2\, R_{śg} = 814{,}46 \text{ mm}$$

$$R_{śd} = \frac{253{,}8 \cdot 400 + 45{,}2 \cdot 399}{253{,}8 + 45{,}2} = 399{,}84 \text{ mm}$$

$$D_{śd} = 2\, R_{śd} = 799{,}68 \text{ mm,}$$

stąd:

$$m = 27{,}30 \text{ mm}$$

$$\frac{m}{2} = 13{,}695$$

linia obojętna zaś:

$$D_0 = 844 \text{ mm.}$$

m) III Metoda autora (patrz wzory 14 do 17 oraz rys. 14) mamy dane:

$$F_{A1} = 4340 \text{ mm}^2 \qquad F_{B1} = 3130 \text{ mm}^2$$
$$F_{A2} = 3640 \text{ mm}^2 \qquad F_{B2} = 2590 \text{ mm}^2$$

a stąd:

$$\lambda_A = \frac{4340}{3640} = 1{,}19923 \qquad \lambda_B = \frac{3130}{2590} = 1{,}2085$$

$$\lambda_ś = \frac{7470}{6230} = 1{,}199$$

Obliczamy:

$$R_B = \frac{253{,}8 \cdot 400 + 233 \cdot 424 + 2 \cdot 15 \cdot \left(\frac{424 + 411}{2}\right)}{253{,}8 + 233 + 2 \cdot 15} = 411{,}81 \text{ mm}$$

$$D_B = 2\,R_B = 823{,}68 \text{ mm}$$

$$R_A = \frac{2 \cdot 22{,}6 \cdot 400 + 2 \cdot 13{,}9 \cdot 335 + 2 \cdot 15 \left(\frac{422 + 411}{2}\right)}{46{,}2 + 27{,}8 + 154 + 202} +$$

$$+ \frac{2 \cdot 77 \left(\frac{411 + 335}{2}\right) + 2 \cdot 101 \left(\frac{335 + 435}{2}\right)}{46{,}2 + 27{,}8 + 154 + 202} = 394{,}07 \text{ mm}$$

$$D_A = 2\,R_A = 758{,}06 \text{ mm}$$

$$R_ś = \frac{3640 \cdot 1{,}19923 \cdot 379{,}03 + 2590 \cdot 1{,}2085 \cdot 411{,}24}{6230 \cdot 1{,}199} = 394{,}07 \text{ mm}$$

a stąd:

$$D_ś = 2\,R_ś = 788{,}14 \text{ mm}$$

Po podzieleniu m na pół otrzymamy

$$m = 45{,}86; \quad \frac{m}{2} = 22{,}93 \text{ mm}$$

a stąd

$$D_0 = 831{,}94 \text{ mm.}$$

n) IV Metoda, (patrz wzory 31, 32 i 17 oraz rys. 15)
Po podstawieniu otrzymamy:

$$R_{A2} = \frac{379{,}03}{1 + \frac{1{,}19923 - 1{,}199}{1{,}199 \cdot 1{,}19923}} = 378{,}97 \text{ mm}$$

$$D_{A2} = 2 \cdot R_{A2} = 757{,}94 \text{ mm}$$

$$R_{B2} = \frac{411{,}84}{1 + \frac{1{,}199 - 1{,}2085}{1{,}199 \cdot 1{,}2085}} = 414{,}56 \text{ mm}$$

$$D_{B2} = 2\, R_{B2} = 829{,}12 \text{ mm}$$

$$R_{ś} = \frac{3640 \cdot 1{,}19923 \cdot 378{,}97 + 2590 \cdot 1{,}2085 \cdot 414{,}56}{6230 \cdot 1{,}199} = 395{,}174 \text{ mm}$$

a stąd:

$$D_{ś} = 790{,}4 \text{ mm.}$$

Po podzieleniu $m = 43{,}6$ mm na pół otrzymamy:

$$\frac{m}{2} = \frac{43{,}6}{2} = 21{,}8 \text{ mm,}$$

a stąd po odczytaniu na rysunku:

$$D_0 = 834{,}0 \text{ mm.}$$

4. Wnioski

Praktyczne przeliczenia wykazały, że otrzymujemy znaczne różnice w wynikach pomiędzy poszczególnymi metodami.

Istnieją pewne grupy metod, przy których kształtownik najwyżej jest położony, a więc 848 mm przy metodach Geleji i Lennoxa, 846,96 mm Benada, 845,7 mm — Tafla, 844,0 przy II autora oraz 842,8 mm — Dahla.

Nieco niżej umieszczamy wykrój według metody Lübkego — 831,0 mm, I autora — 830,0 mm, III autora — 831,94 oraz IV autora — 834,0 mm. Ostatnia grupa umieszcza jeszcze niżej wykrój, należą do nich metody: Dahl — Winogradow — 818,65 mm i metoda środka ciężkości 799,4 mm.

Z zestawienia tego wynika, że istnieją trzy różne grupy metod, przy których otrzymuje się zbliżone do siebie wyniki: I grupa: Geleji, Lennox, Benad, Tafel oraz II autora. II grupa: Lübke, Bachtinow — Szternow oraz I autora, III i IV. III grupa: Dahl — Winogradow, środka ciężkości.

Jeśli chodzi o ujęcie wpływu przepływu metalu metodą IV autora, to wynosi on tu około 2 do 3 mm. Ciekawe byłoby przeanalizowanie tego wpływu w wykrojach wstępnych, gdzie ten przepływ metalu jest o wiele znaczniejszy.

W analizowanym przekroju współczynniki wydłużenia λ_A i λ_B są prawie równe λ_s, a więc nie będzie prawie przepływania metalu w wykroju, a stąd wpływ na położenie wykroju jest prawie niestwierdzalny.

Przez tę właśnie wstępną próbę klasyfikacji i porównanie metod pomiędzy sobą nie otrzymamy jeszcze całkowitego rozwiązania, lecz porównanie i ocenę otrzymanych wartości.

W wyniku otrzymujemy wahania położenia D_0 pomiędzy D_0 najniższym 848,0 mm a D_0 najwyższym 831,0 mm, a więc wahania w granicach 17,0 mm, gdyż metody środka ciężkości i Dahla — Winogradowa wybitnie wyłamują się od tych wartości. Rzeczywistym sprawdzianem wartości poszczególnych metod mogą być tylko na dużą skalę przeprowadzone pomiary równocześnie nacisku walców, momentów i szybkości wejściowej i wyjściowej.

Wtedy dopiero otrzymać można będzie dostateczną ilość danych, które pozwolą na prawidłowe umieszczanie wykroju w walcach. Całe dotychczasowe wywody oparte były na „klasycznej teorii walcowania". Ostatnie pomiary G. Juretzka [16] stwierdziły, że ważnym czynnikiem może być wielkość samego gniotu.

Jeśli gniot jest stosunkowo mały, to walcowanie niewiele odbiega od klasycznych założeń, natomiast przy dużych gniotach zachodzą całkowicie odmienne przebiegi, które można wyłącznie pomiarami stwierdzić.

BIBLIOGRAFIA

[1] E. Werlisch, *St. u. Eisen*, t. 33. 1913, str. 1861—63.

[2] W. Tafel, *Walzen und Walzenkalibrieren*, Dortmund 1923.

[3] W. Dahl, *Beitrag zur Bestimmung der neutralen Linie eines Kalibers. St. u. Eisen.* t. 41. 1924, str. 633/5.

[4] A. Benad, *Metallurgie und Giesserei Technik*, t. 2. 1952, str. 48.

[5] H. Neumann, *Grundlagen der Walzwerkstechnik und Kalibrierung*, Leipzig 1954.

[6] A. P. Winogradow i A. G. Winogradow, *Kalibrowka prokatnych wałkow*, Moskwa 1950.

[7] H. Hoff i Th. Dahl, *Walzen und Kalibrieren*, Düsseldorf 1954.

[8] B. Bachtinow, M. Szternow, *Kalibrowka prokatnych wałkow*, Moskwa 1953.

[9] B. Robinson, W. Lugar, *Roll — Desing Research as Applied to Rolling — Mill Development.* „Journal of the Iron and Steel Institute", t. 1953, str. 183/197.

[10] A. Geleji, *Berechnung des Leistungbedarfs bei der Walzung in Kalibern.* Acta Technica. IX. 1/2. 1954,str. 203/10.

[11] A. Geleji, *Die Berechnung der Kräfte und des Arbeitsbedarfs.* Budapest 1955, II wyd.

[12] Z. Wusatowski, *Obliczanie szybkości w procesie walcowania.* Prace IMet. t. 4. 1952. str. 1/47.

[13] Z. Wusatowski, *Podstawy procesu walcowania,* Katowice 1952.

[14] W. Trinks, *Kalibrowanie walców,* Katowice 1948.

[15] J. Górecki, *Poprzeczne płynięcie metalu w wykrojach nieregularnych.* „Hutnik", t. 18. 1051, str. 179/85.

[16] G. Juretzek, *Walzdrücke und Drehmomente bei Walzen auf Flachbahnen mit Ober- und Unterdruck.* „Freiberger Forschungshefte" B. 16. 1957, str. 58 — 81.