ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 7.3353/03 Jerzy HERIAN

POSZERZENIE I ZMIANA KSZTAŁTU PASMA W PROCESIE PŁASZCZENIA DRUTÓW

HUTNICTWO z. 66



GLIWICE 2003

POLITECHNIKAŚLĄSKAZESZYTY NAUKOWENr 1567

7.3353/03

Jerzy HERIAN

POSZERZENIE I ZMIANA KSZTAŁTU PASMA W PROCESIE PŁASZCZENIA DRUTÓW

| | • • • |
|--|-------|

OPINIODAWCY

Prof. dr inż. Bogdan GOLIS Prof. dr hab. inż. Janusz ŁUKSZA Dr hab. inż. Antoni PIELA - Profesor Politechniki Śląskiej

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR DZIAŁU SEKRETARZ REDAKCJI — Mgr Elżbieta LEŚKO

REDAKTOR NACZELNY — Prof. dr hab. Zygmunt KLESZCZEWSKI - Prof. dr hab. inż. Stanisław SERKOWSKI

> REDAKCJA Mgr Roma ŁOŚ

REDAKCJA TECHNICZNA Alicja NOWACKA

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0324-802X

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice tel./fax (0 prefiks 32) 237-13-81 Dział Sprzedaży i Reklamy (0 prefiks 32) 237-18-48

www.polsl.gliwice.pl/alma.mater/wps.html wydawnictwo@polsl.gliwice.pl

Nakł. 100+50 Ark. wyd. 10 Ark. druk. 9,125 Oddano do druku 16.01.03 r. Podpis. do druku 16.01.03 r. Zam. 15/03

Papier offset. 70x100, 80 g Druk ukończ. w styczniu 2003 r.

Fotokopie, druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, ul. Kujawska 1

SPIS TREŚCI

| | Wyk | az ważniejszych oznaczeń | 9 |
|---|------|--|----|
| • | Wpr | owadzenie | 11 |
| | Anal | iza poszerzenia pasma w procesie płaszczenia drutów okrągłych metodą | |
| | walc | owania | 13 |
| | 2.1. | Geometryczna kotlina odkształcenia | 14 |
| | 2.2. | Odkształcenia w procesie płaszczenia drutów | 20 |
| | 2.3. | Wpływ parametrów procesu płaszczenia drutów na poszerzenie pasma | 25 |
| • | Teza | , cel i zakres pracy | 37 |
| • | Bada | nia własne | 39 |
| | 4.1. | Funkcje opisujące poszerzenie pasma o przekroju kołowym w procesie | |
| | | płaszczenia metodą walcowania | 39 |
| | 4.2. | Funkcje opisujące zarys kształtu przekroju poprzecznego pasma w procesie | |
| | | płaszczenia drutów metodą walcowania | 45 |
| | 4.3. | Druty stosowane w badaniach oraz ich własności | 49 |
| | 4.4. | Metodyka badania poszerzenia w procesie płaszczenia drutów | 51 |
| | 4.5. | Wpływ parametrów walcowania na poszerzenie w procesie płaszczenia | |
| | | drutów po wyżarzaniu ze stali niskowęglowej w gatunku C4D | 55 |
| | 4.6. | Wpływ parametrów walcowania na poszerzenie w procesie płaszczenia dru- | |
| | | tów po patentowaniu ze stali węglowych w gatunku: C20D, C56D i C88D | 66 |
| | 4.7. | Wpływ własności materiału na poszerzenie w procesie płaszczenia drutów | |
| | | ze stali węglowych | 76 |
| | 4.8. | Promień zarysu powierzchni swobodnej pasma w procesie płaszczenia | |
| | | drutów | 82 |
| | 4.9. | Symulacja procesu płaszczenia drutów na zimno metodą elementów | 96 |
| | | skończonych | |
| | | | |

| | 4.9.1. Własności mechaniczne materiału i warunki brzegowe symulacji procesu 4.9.2. Wyniki komputerowej symulacji | 96 97 |
|----|---|----------|
| 5. | Analiza wyników | 116 |
| | 5.1. Weryfikacja doświadczalna przyjętej zależności opisującej poszerzenie | 116 |
| | 5.2. Weryfikacja zależności opisujących promień powierzchni swobodnej po | |
| | jedno- i wieloprzepustowym płaszczeniu | 122 |
| | 5.3. Porównanie wielkości poszerzenia i promienia obliczonych różnymi | |
| | metodami | 127 |
| | 5.4. Algorytm doboru parametrów początkowych drutu dla żądanych wymiarów | v |
| | taśmy | 131 |
| 6. | Podsumowanie i wnioski | 136 |
| | Literatura | 140 |
| | Streszczenia | 143 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

| ~ | літі | INTS | |
|----------|-------|---|----|
| ~ | | 1.1.9 | |
| | List | of important symbols | 9 |
| • | Intro | oduction | 11 |
| | The | analysis of widening the band in the process of flattening the round | 13 |
| | wire | s by rolling | |
| | 2.1. | Geometrical deformation rollgap | 14 |
| | 2.2. | Deformations in the process of flattening of the wires | 20 |
| | 2.3. | The influence of the wire flattening parameters on widening of the band | 25 |
| | The | thesis, the aim and the research scope | 37 |
| . | Rese | arch work | 39 |
| | 4.1. | Functions describing the widening of round section band in the process of | |
| | | flattening using rolling method | 39 |
| | 4.2. | Functions describing the shape profile of a band lateral section in the pro- | |
| | | cess of flattening the wires using rolling method | 45 |
| | 4.3. | The types of wires used in examinations and their properties | 49 |
| | 4.4. | Methodology of examining the widening in the process of flattening the | |
| | | wires | 51 |
| | 4.5. | The influence of rolling parameters on widening in the process of | |
| | | flattening the C4 low-carbon wires after annealing | 55 |
| | 4.6. | The influence of rolling parameters on widening in the process of flattening | |
| | | the C20D, C56D and C88D carbon steel wires after patenting | 66 |
| | 4.7. | The influence of material properties on widening in the process of | |
| | | flattening of carbon steel wires | 76 |
| | 4.8. | The radius of a band free profile in the process of flattening the wires | 82 |
| | 4.9. | Simulation of the process of cold flattening of the wires applying the finite | |
| | | elements method | 96 |

| | | 4.9.1. Mechanical properties of the material and boundary conditions of t | he |
|----|-------|--|-----|
| | | process simulation | 96 |
| | | 4.9.2. The results of computer simulation | 97 |
| 5. | Resu | ilts analysis | 116 |
| | 5.1. | Experimental verification of the assumed dependence describing | |
| | | the widening process | 116 |
| | 5.2. | Verification of dependencies which describe the radius of free surface | |
| | | after single and multi pass flattening | 122 |
| | 5.3. | Comparison of the size of widening to the radius calculated by different | |
| | | methods | 127 |
| | 5.4. | The algorithm of initial parameters selection of the wire for the required | |
| | | dimensions of a strip | 131 |
| 6. | Reca | pitulation and conclusions | 136 |
| | Bibli | iography | 140 |
| | Sum | maries | 143 |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

| IN | HAL | TSVE | CRZEICHNIS | |
|----|-------|---------|---|----------|
| | Liste | der B | ezeichnungen | 9 |
| 1. | Einf | ührung | | 11 |
| 2. | Anal | yse dei | r Breitung des Bandes beim Flachwalzen von Runddrähte | 13 |
| | 2.1. | Geom | etrischer Verformungsspalt | 14 |
| | 2.2. | Verfo | rmungen beim Flachwalzen von Drähte | 20 |
| | 2.3. | Einflu | ß der Parameter vom Drahtabflachungprozeß auf die Bandbreitung | 25 |
| 3. | Thes | e, Ziel | und Bereich der Arbeit | 37 |
| 4. | Eige | ne Unt | ersuchungen | 39 |
| | 4.1. | Die di | e Breitung des Bandes mit Kreisquerschnitt beim Flachwalzen | |
| | | besch | reibenden Funktionen | 39 |
| | 4.2. | Die da | as Profil der Form des Bandquerschnittes beim Flachwalzen von Draht | |
| | | besch | reibenden Funktionen | 45 |
| | 4.3. | Die in | den Untersuchungen verwendeten Drähte und ihre Eigenschaften | 49 |
| | 4.4. | Metho | odik der Untersuchung der Breitung im Drahtabflachungprozeß | 51 |
| | 4.5. | Einflu | ß der Walzenparameter des Abflachungprozesses auf die Breitung | |
| | | vom I | Draht aus niedriggekohtem Stahl Sorte C4D nach dem Glühen | 55 |
| | 4.6. | Einflu | ß der Walzparameter des Abflachungprozesses auf die Breitung vom | |
| | | Draht | aus Kohlenstahlen Sorten: C20D, C56D und C88D nach dem | 66 |
| | 4.7. | Einflu | iß der Werkstoffeigenschaften die Breitung im Abflachungprozeß von | |
| | | Draht | aus Kohlenstahlen | 76 |
| | 4.8. | Radiu | s des Profils der freien Streifensfläche im Drahtabflachungprozeß | 82 |
| | 4.9. | Simul | ation des Prozesses der kalten Drahtabflachung mit der Methode der | |
| | | finiter | Elementen | 96 |
| | | 4.9.1 | Mechanische Werkstoffeigenschaften und Randbedingungen der | 06 |
| | | 4.9.2 | Simulation des Prozesses Ergebnisse der Computersimulation | 96 97 |
| | | | | |

| 5. | Anal | yse der Ergebnisse | | 116 | |
|----|------|--|----|-----|--|
| | 5.1. | Empirische Verifikation der die Breitung beschreibenden angenommenen | ı | | |
| | | Abhängigkeit | | 116 | |
| | 5.2. | Verifikation der das Radius der freien Fläche nach der ein- und mehrfach | en | | |
| | | Abflachung beschreibenden Abhängigkeiten | | 122 | |
| | 5.3. | Vergleich der mit unterschiedlichen Methoden berechneten Grössen der | | | |
| | | Breitung und des Radius | | 127 | |
| | 5.4. | Algorithmus der Auswahl der Drahtanfangsparameter für die verlangten | | | |
| | | Bandausmaße | | 131 | |
| 6. | Zusa | mmensetzung und Schlußfolgerungen | | 136 | |
| | Lite | raturverzeichnis | | 140 | |
| | Zusa | ummenfassungen | | 143 | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

| A_{100} | - wydłużenie względne, |
|--|--|
| b | - maksymalna szerokość taśmy, |
| b1 | - szerokość pasma po pierwszym przepuście w I fazie płaszczenia, |
| b _{i-1} | - szerokość pasma przed i-1 przepustem w II fazie płaszczenia, |
| bi | - pasma po n-tym przepuście, |
| b _n | - bieżąca szerokość pasma po i-tym przepuście w II fazie płaszczenia, |
| b _x | - szerokość pasma w kotlinie walcowniczej, |
| b _{si} | - szerokość styku metalu z walcem w płaszczyźnie wyjścia w i-tym przepuście. |
| b _{sx} | - bieżąca szerokość styku metalu z walcem w kotlinie walcowniczej, |
| bś | - średnia szerokość pasma w kotlinie walcowniczej, |
| do | - początkowa średnica drutu, |
| D | - średnica walców, |
| F | - zmienna rozkładu Snedecora-Fishera, |
| h | - grubość taśmy, |
| \mathbf{h}_1 | - grubość pasma po pierwszym przepuście w I fazie płaszczenia, |
| h _{i-1} | - grubość pasma przed i-1 przepustem w II fazie płaszczenia, |
| h _i | - grubość pasma po i-tym przepuście w II fazie płaszczenia, |
| h _n | - grubość pasma po n-tym przepuście, |
| h _x | - bieżąca grubość pasma w kotlinie walcowniczej, |
| hś | - średnia grubość pasma w kotlinie walcowniczej, |
| H _j , H _p | - współczynnik dla I i II fazy płaszczenia ($H_j = tg \alpha_j, H_p = tg \alpha_p$), |
| H _s , H _e , H _o | - współczynnik w równaniu (12) dla płaszczenia drutów odpowiednio: bez |
| | smarowania (na sucho), ze smarowaniem emulsją i ze smarowaniem olejem, |
| Ko | - stała materiałowa, |
| K _p | - współczynnik zależny od stosunku obwodu przekroju taśmy do obwodu |
| | przekroju drutu, |
| k _b | - wskaźnik poszerzenia ($k_b = \Delta b / \Delta h$), |
| k _H | - wykładnik zależny od D/d _o , |
| ld | - długość rzutu łuku styku metalu z walcami na kierunek walcowania, |
| La | - długość rzutu łuku styku metalu z walcami w pierwszym przepuście w fazie I, |
| l _{di-1} | - długość rzutu łuku styku metalu z walcami w i-1 przepuście w fazie II, |
| n | - wykładnik w równaniu krzywej umocnienia, |
| np. | - liczba przepustów, |
| p | - prawdopodobieństwo, |
| r | - promień zarysu powierzchni swobodnej pasma, |
| ri, rn | - promień zarysu powierzchni swobodnej pasma po i-tym i n-tym przepuście, |
| rz | - zmierzony promień zarysu powierzchni swobodnej pasma, |
| R | - współczynnik korelacji, |
| $R_{c}, R_{0,2}$ | - wyraźna i umowna granica plastyczności, |
| Rm | - wytrzymałość na rozciąganie, |
| S_{i-1}, S_i | - powierzchnia przekroju poprzecznego pasma przed i-1 i po i-tym przepuście, |
| Sd | - rzut powierzchni styku metalu z walcem, |
| S _k | - odcnylenie standardowe, |
| Т | - czas nagrzewania drutow podczas patentowania, zmienna rozkładu Studenta, |
| tw | - czas nagrzewania drutow podczas wyzarzania, |
| Т | - temperatura, |
| TA | - temperatura austenityzacji, |

| T _{ko} | - temperatura kąpieli chłodzącej - ołowiowej, | |
|--------------------------------|---|-------------------|
| Tw | - temperatura wyżarzania, | |
| Z | - przewężenie, | |
| v | - prędkość walcowania, | 1 WPR |
| v_x, v_y, v_z | - składowe prędkości płynięcia metalu w układzie współrzędnych kartezjańskich (x, y, z), | 1. 11 10 |
| α_i | - kąt chwytu pasma z walcami w i-tym przepuście, | Duman |
| α_j | - kąt nachylenia półprostej do osi odciętej dla odkształcania drutu w fazie I, | Dynar |
| αρ | - kąt nachylenia półprostej do osi odciętej dla odkształcania pasma płaskiego w fazie II, | stawia się |
| β | - współczynnik poszerzenia, | nania jak |
| βi | - współczynnik poszerzenia w i-tym przepuście (β _i =b _i /b _{i-1}), | nama, jak |
| β _c | - całkowity współczynnik poszerzenia ($\beta_c = b_n/d_o$), | szerokości |
| β _{cp} | - całkowity współczynnik poszerzenia przy płaszczeniu w fazie II, | i metali zi |
| β1 | - współczynnik poszerzenia przy płaszczeniu w fazie I, | |
| β_{1m} | - graniczny współczynnik poszerzenia przy płaszczeniu w fazie I, | nym, elekt |
| γ | - współczynnik gniotu, | Płaszc |
| γi | - współczynnik gniotu w i-tym przepuście ($\gamma_i = h_i/h_{i-1}$), | rolizowar |
| γc | - całkowity współczynnik gniotu ($\gamma_c = h_p/d_p$), | Teanzowan |
| γ _{cp} | - całkowity współczynnik gniotu przy płaszczeniu w fazie II, | Kształty pr |
| γ1 | - współczynnik gniotu przy płaszczeniu w fazie I, | |
| γım | - graniczny współczynnik gniotu przy płaszczeniu w fazie I, | |
| Ψ | - wykładnik zależny od parametrów procesu płaszczenia, | |
| Δ | błąd względny (iloraz różnicy między wartością zmierzoną a obliczoną do | |
| | wartości zmierzonej), | |
| Δb | - poszerzenie bezwzględne, | |
| Δh | - gniot bezwzględny, | |
| δ | - współczynnik kształtu pasma płaskiego ($\delta = b_1/h_1$) przed odkształcaniem w II fazie, | 1 |
| ε _h | - gniot względny, | |
| € _{hc} | - całkowity gniot wzgiędny, | 1 |
| ε _{bc} | - całkowite poszerzenie względne, | |
| ε _w | - wskaźnik kształtu walców, ($\varepsilon_w = h_o/D$), | |
| φi | - odkształcenie rzeczywiste, | |
| φ _{oi} | - początkowe odkształcenie rzeczywiste, | 1000 |
| μ | - współczynnik tarcia, | |
| $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ | naprężenia normalne, działające w płaszczyznach prostopadłych do osi układu współrzędnych kartezjańskich (x, y, z), | |
| σ _p | - naprężenie uplastyczniające, | |
| σ_{ps} | - średnie naprężenie uplastyczniające, | |
| σ_0, σ_1 | - naprężenie pochodzące od naciągu i przeciwciągu, | |
| σ_{po}, σ_{p1} | - naprężenie uplastyczniające przed i po przepuście, | |
| ρ | - względny promień zarysu powierzchni swobodnej pasma po przepuście, $\rho = r/h$. | Der 1 V. |
| Indeksy | | Fig 1 The st |
| i | - liczby naturalne od 1, 2do n | - 15. 1. 1 tie 5. |

Uwaga: pozostałe oznaczenia objaśniono w tekście.

1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój różnych gałęzi przemysłu powoduje, że wyrobom metalowym stawia się coraz wyższe wymagania zarówno w zakresie ich własności, dokładności wykonania, jak i sposobu wytwarzania. Płaszczone na zimno taśmy o grubości h = 0,01 do 8 mm i szerokości b = 0,1 do 30 mm z naturalnie zaokrąglonymi brzegami z różnych gatunków stali i metali znajdują zastosowanie w przemyśle włókienniczym, samochodowym, energetycznym, elektromaszynowym i precyzyjnym [27, 28, 35, 39, 54, 57, 60, 63].

Płaszczenie drutów okrągłych na wąskie taśmy w walcarkach o walcach cylindrycznych realizowane jest w zasadzie w kilku przepustach (tzw. walcowanie wieloprzepustowe). Kształty przekroi poprzecznych pasma podczas walcowania drutu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Kształty przekroju poprzecznego pasma po kolejnych przepustach walcowania drutu Fig. 1. The shapes of lateral section of a band after successive roll passes of wire

Uzyskanie w procesie płaszczenia wymaganej grubości i szerokości taśmy jest uwarunkowane prawidłowym doborem początkowej średnicy drutu i jego wstępnego przygotowania (mała tolerancja średnicy) dla zadanych parametrów płaszczenia i średnicy walców w warunkach przeróbki na zimno. Początkową średnicę drutu do płaszczenia dobiera się na podstawie ilościowego związku, opisującego zmiany poszerzenia w zależności od odkształcenia i parametrów technologicznych procesu.

Proces wieloprzepustowego płaszczenia drutów metodą walcowania charakteryzuje złożony przebieg odkształcenia, w którym można wyróżnić dwie fazy odkształcania (rys. 1) [18]:

- w fazie I (pierwszy przepust lub jednoprzepustowe płaszczenie) jest walcowany drut o
 przekroju kołowym z nierównomiernym gniotem na szerokości,
- w fazie II (płaszczenie wieloprzepustowe) w kolejnych przepustach jest walcowane pasmo płaskie z zaokrąglonymi brzegami prawie równomiernym gniotem na szerokości.

Występujący odmienny charakter odkształcania przy walcowaniu w I i II fazie podczas płaszczenia drutów powoduje, iż płynięcie metalu w kotlinie odkształcenia jest silnie zróżnicowane, a szczególnie w pierwszym przepuście.

Znane z literatury [1, 14÷17, 19, 20, 34, 42, 47, 62, 64, 65] zależności charakteryzujące zmiany poszerzenia w procesie płaszczenia drutów na zimno nie uwzględniają istoty charakteru odkształcania pasma, jakiego doznaje w kolejnych przepustach, oraz z tym związanych parametrów procesu i wielkości kształtu pasma. Opracowana przez autora zależność funkcyjna opisująca poszerzenie pasma [18], która ujmuje zróżnicowanie gniotu na jego szerokości, jakiego doznaje w kolejnych fazach procesu wieloprzepustowego płaszczenia drutu, pozwoli dokładniej przewidywać wielkość poszerzenia.

Podczas odkształcania pasma zarówno w I fazie, jak i w II na długości kotliny odkształcenia następuje ciągła zmiana promienia powierzchni swobodnej, a tym samym kształtu poprzecznego pasma [52, 62, 65]. Opracowanie funkcji opisujących zarys kształtu przekroju poprzecznego dla danych warunków odkształcania pozwoli określić kształt poprzeczny pasma za pomocą promienia powierzchni swobodnej i szerokości styku metalu z walcem. Wyjaśni również, jak parametry procesu wpływają na kształt i wymiary pasma płaszczonego.

Opracowanie zależności: opisujących poszerzenie i zarys kształtu przekroju poprzecznego pasma umożliwi prawidłowo projektować proces płaszczenia na zimno drutów okrągłych ze stali węglowych na wąskie taśmy podczas jedno- i wieloprzepustowego walcowania. Zależności te pozwolą na racjonalny dobór początkowej średnicy drutu do płaszczenia w określonych warunkach walcowania, dla żądanych wymiarów taśmy.

2. ANALIZA POSZERZENIA PASMA W PROCESIE PŁASZCZENIA DRUTÓW OKRĄGŁYCH METODĄ WALCOWANIA

Płynięcie metalu w prostym i symetrycznym procesie walcowania na gorąco jest dobrze poznane doświadczalnie oraz teoretycznie [3, 6, 7, 26, 56, 59, 66]. Na podstawie znanych zależności między poszerzeniem a gniotem i parametrami procesu można z dużą dokładnością obliczyć wartość poszerzenia.

Podczas walcowania na zimno wyrobów o przekroju płaskim (taśm i blach) występuje minimalne poszerzenie, gdy wskaźnik kształtu pasma, wyrażony stosunkiem początkowej szerokości do początkowej grubości, jest bliski 20 [3, 26, 66]. W praktyce, w procesie walcowania na zimno taśm i blach wskaźnik ten jest znacznie większy od 20. Przyjęto, że odkształcany metal między walcami płynie tylko w kierunku wzdłużnym, a pasmo nie doznaje poszerzenia. Występuje wówczas płaski stan odkształcenia [3, 6, 7, 26, 40, 56]. Z tych powodów badania poszerzenia podczas walcowania na zimno nie wzbudziły wśród badaczy większego zainteresowania.

Wąskie taśmy z naturalnie zaokrąglonymi brzegami produkuje się z drutów okrągłych przez ich płaszczenie w walcarkach o walcach cylindrycznych lub kulowych oraz metodą ciągnienia przez ciągadła walcowe. Do płaszczenia drutów metodą walcowania stosowane są zespoły walcownicze jednoklatkowe typu nawrotnego lub ciągłe dwu-, trzy- lub nawet pięcioklatkowe. Klatki robocze walcarek są typu duo o średnicy walców od 25 - 260 mm. W liniach ciągłych mogą być stosowane, jako wykańczające, walcarki kwarto. Walcarki wyposażone są w walce o małym stosunku (L/D < 1) długości beczki walca (L) do jego średnicy (D). Taka geometria walca w czasie walcowania zapewnia mniejsze ugięcie sprężyste walca, a tym samym taśmy po walcowaniu wykazują mniejsze zróżnicowanie grubości na szerokości.

Stosowany do płaszczenia wsad ma postać walcówki lub drutu o średnicy w zakresie 0,3 ÷ 8 mm. W celu zwiększenia dokładności wymiarów płaszczonych taśm wsad przed płaszczeniem poddawany jest wstępnemu ciągnieniu.

Uzyskane taśmy w procesie płaszczenia drutów charakteryzuje mała tolerancja grubości, duża płaskość i naturalnie zaokrąglone brzegi. Wytrzymałość na rozciąganie taśm płaszczonych wynosi od 400 do 3000 MPa w stanie umocnionym lub jest w zakresie od 1300 do1900 MPa po hartowaniu i odpuszczaniu w zależności od gatunku stalowych drutów i ich stanu wyjściowego [30, 50, 54, 57, 60, 62, 63]. Płaszczenie drutów staje się jedyną metodą produkcji wąskich taśm w tych przypadkach, gdy obok wymagań jakościowych konieczne jest spełnienie warunku, by naturalny brzeg taśmy był odpowiednio zaokrąglony.

W trakcie płaszczenia drutu między walcami w kotlinie walcowniczej pasmo ulega odkształceniu plastycznemu, przemieszczona objętość metalu płynie w kierunku wzdłużnym i poprzecznym do kierunku walcowani. Pasmo doznaje wydłużenia i poszerzenia. Poszerzenie w tym procesie jest zjawiskiem korzystnym, dzięki któremu uzyskuje się żądaną szerokość taśmy. Uzyskanie żądanych wymiarów taśmy w danych warunkach walcowania zapewnia prawidłowy dobór początkowej średnicy drutu, co w płaszczeniu drutów okrągłych jest podstawowym zagadnieniem.

2.1. Geometryczna kotlina odkształcenia

Sposób przemieszczania się materiału w trakcie procesu płaszczenia drutów między walcami jest istotny dla analizy procesu odkształcania, gdyż określa geometrię kotliny odkształcenia. Geometria kotliny odkształcenia zależy od średnicy płaszczonego drutu, średnicy walców i wartości gniotu. Kotlinę odkształcenia podczas płaszczenia drutu okragłego przedstawiono na rys. 2.





Wielkościami charakteryzującymi kotlinę odkształcenia są:

- gniot w przepuście ε_{h1},
- rzut łuku styku metalu z walcem ld1,
- szerokość styku metalu z walcem w płaszczyźnie wyjścia bs1,
- naturalny promień zaokrąglenia boku powierzchni swobodnej pasma r₁,
- średnica drutu do,
- średnica walców D.

Płaszczyzna wejścia przechodzi przez dwa punkty początku styku metalu z walcami i jest równoległa do płaszczyzny przechodzącej przez osie walców. Od płaszczyzny wejścia, w miarę przemieszczania się metalu między walcami, szerokość jego powierzchni styku z walcami wzrasta kosztem zmniejszania się części swobodnych pasma. Odkształcana objętość zawarta jest pomiędzy płaszczyznami wejścia i wyjścia, powierzchniami styku metalu z walcami oraz bocznymi powierzchniami swobodnymi pasma. Kształt oraz wielkość powierzchni styku metalu z walcem oraz powierzchni swobodnych pasma zależą od wielkości gniotu, średnicy walców i średnicy drutu.

Płaskie pasmo po pierwszym przepuście posiada stałą grubość na szerokości styku metalu z walcem (b_{s1}) i naturalnie zaokrąglone brzegi. Podczas płaszczenia w drugim i kolejnych przepustach odkształcenie jest równomierne na szerokości pasma. Kształt kotliny odkształcenia płaszczonego pasma (rys. 3) różni się od kotliny odkształcenia w pierwszym przepuście (rys. 2).

W II fazie płaszczenia pasma kształt kotliny odkształcenia jest podobny do kształtu kotliny odkształcenia przy walcowaniu pasma o przekroju prostokątnym. W tym przypadku wielkościami charakteryzującymi kotlinę odkształcenia dla przepustu i ≥ 2 są:

- początkowe wymiary pasma h_{i-1} i b_{i-1},
- rzut łuku styku metalu z walcem ldi,
- szerokość styku metalu z walcem w płaszczyźnie wejścia i wyjścia b_{si-l} i b_{si},
- naturalny promień zaokrąglenia boku powierzchni swobodnej przed i po przepuście r_{i-1} i r_i ,
- średnica walców D.

Charakter płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia podczas płaszczenia drutu okrągłego w pierwszym, jak i w kolejnych przepustach pozostaje w ścisłym związku z początkowymi wymiarami odkształcanego pasma, wielkością gniotu w każdym przepuście i średnicą walców.

Tablica 1

Wskaźniki odkształcenia w procesie płaszczenia drutu



Rys. 3. Schemat kotliny odkształcenia przy płaszczeniu pasma płaskiego (II faza) Fig. 3. The diagram of deformation rollgap during flat band flattening (phase II)

Wzory opisujące współczynniki odkształcenia i względny gniot w procesie płaszczenia drutu przedstawiono w tablicy 1. Parametry charakteryzujące kotlinę odkształcenia na podstawie danych zawartych w pracach [62, 65] zebrano w tablicy 2. Dodatkowo w tablicy 2 ujęto wzory opisujące powierzchnię styku metalu z walcami. Zależności te są niezbędne w przypadku wyznaczania sił nacisku metalu na walce, momentu walcowania i mocy napędu walcarki.

Znajomość wartości naturalnego promienia zaokrąglenia powierzchni swobodnej płaszczonego pasma ma decydujące znaczenie dla dokładności obliczenia wymiarów pasma i powierzchni przekroju poprzecznego. Zamieszczone w literaturze [31, 36, 48, 52, 62, 65] wzory opisujące naturalny promień zaokrąglenia powierzchni swobodnej pasma przedstawiono w tablicy 3. Znajomość powierzchni przekroju poprzecznego pasma przed i po płaszczeniu pozwala obliczyć współczynnik wydłużenia w danym przepuście. Określenie zaś drugiego wskaźnika odkształcenia (współczynnika gniotu lub poszerzenia) daje podstawy do pełniejszej analizy płynięcia metalu podczas płaszczenia drutów.

| Lp. | OPIS | WZÓR |
|-----|--|--|
| 1 | Współczynnik gniotu w pierwszym przepuście (faza I) | $\gamma_1 = \frac{h_1}{d_o}$ |
| 2 | Współczynnik gniotu w i-tym przepuście (faza II) | $\gamma_{pi} = \frac{h_i}{h_{i-1}}$ |
| 3 | Całkowity współczynnik gniotu po n-tym przepuście (faza II) | $\gamma_{cpn} = \frac{h_n}{h_1}$ |
| 4 | Całkowity współczynnik gniotu (faza I + II) | $\gamma_{e} = \frac{h_{n}}{d_{o}}$ |
| 5 | Współczynnik poszerzenia w pierwszym przepuście (faza I) | $\beta_1 = \frac{b_1}{d_0}$ |
| 6 | Współczynnik poszerzenia w i-tym przepuście (faza II) | $\beta_{pi} = \frac{b_i}{b_{i-1}}$ |
| 7 | Całkowity współczynnik poszerzenia po n-tym przepuście (faza II) | $\beta_{cpn} = \frac{b_n}{b_1}$ |
| 8 | Całkowity współczynnik poszerzenia (faza I + II) | $\beta_{c} = \frac{b_{n}}{d_{o}}$ |
| 9 | Względny gniot w pierwszym przepuście (faza I) | $\epsilon_{h1} = \frac{d_o - h_1}{d_o}$ |
| 10 | Względny gniot w i-tym przepuście (faza II) | $\boldsymbol{\epsilon}_{hpi} \ = \frac{\boldsymbol{h}_{i\!-\!l}\!-\!\boldsymbol{h}_{i}}{\boldsymbol{h}_{i\!-\!l}}$ |
| 11 | Całkowity względny gniot (faza I + II) | $\varepsilon_{hc} = \frac{d_o - h_n}{h_n}$ |

-

Tablica 2

Parametry charakteryzujące geometrię kotliny odkształcenia [62]

| Lp. | OPIS | WZÓR |
|-----|---|---|
| 1 | Długość rzutu łuku styku metalu z walcem w pierwszym przepuście bez uwzględnienia spłaszczenia walców (faza I) | $l_{d1} = \sqrt{\frac{D(d_o - h_1)}{2}}$ |
| 2 | Długość rzutu łuku styku metalu z walcem w i-tym przepuście bez uwzględnienia spłaszczenia walców (faza II) | $l_{d1} = \sqrt{\frac{D(h_{i-1} - h_i)}{2}}$ |
| 3 | Stosunek rzutu łuku metalu z walcem do średniej grubości pasma w i-tym przepuście (faza II) | $\frac{l_{d}}{h_{s}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{hi}D}{d_{o}(1-\varepsilon_{hc})}}$ |
| 4 | Stosunek średniej szerokości pasma do rzutu łuku styku metalu z walcem w i-tym przepuście (faza II) | $\frac{\mathbf{b}_{i}}{\mathbf{l}_{d}} = \beta_{i} \sqrt{\frac{\mathbf{d}_{o}}{\mathbf{D}(1 - \varepsilon_{hc})\varepsilon_{hi}}}$ |
| 5 | Rzut powierzchni styku metalu z walcem w pierwszym przepuście bez uwzględnienia wpływu naciągów (faza I) | $S_{d} = (d_{o} - h_{1})\sqrt{\frac{D(d_{o} + h_{1})}{2}}$ |
| 6 | Rzut powierzchni styku metalu z walcem w i-tym przepuście bez uwzględnienia wpływu naciągów (faza II) | $S_{d} = 1,1 \frac{(b_{i-1} + b_{i})}{2} \sqrt{\frac{D(h_{i-1} - h_{i})}{2}}$ |
| 7 | Rzut powierzchni styku metalu z walcem w pierwszym prze- puście z uwzględnieniem wpływu naciągów (faza I) | $S_{d} = b_{1} \left(0.83 - 0.6 \frac{h_{1}}{d_{0}} \right) \sqrt{\frac{D(d_{0} + h_{1})}{2}}$ |
| 8 | Rzut powierzchni styku metalu z walcem w i-tym przepuście z uwzględnieniem wpływu naciągów (faza II) | $S_{d} = \left[\left(\frac{b_{i-1} + b_{i}}{2} \right) - \left(0.56 \frac{h_{i-1} + h_{i}}{2} \right) \right] \sqrt{D(h_{i-1} - h_{1})}$ |

Wzór (1) w tablicy 3, opisujący powierzchnię przekroju poprzecznego pasma, otrzymano po przyjęciu, że promień zaokrąglenia powierzchni swobodnej wynosi r = 0,6 h, a powierzchnia odcinka koła jest równa 2/3 powierzchni prostokąta opisanego na nim. Założenia te są w dużym stopniu uproszczeniem, co ma wpływ na końcowy wynik. Względny błąd pomiędzy zmierzonym przekrojem poprzecznym pasma a obliczonym według wzoru (1) w tablicy 3 jest tym większy, im stosunek b/h przyjmuje mniejsze wartości. Wzór empiryczny (2) w tablicy 3 został opracowany na podstawie wyników pomiarów cech geometrycznych pasma płaszczonego. Tablica 3

Cechy geometryczne płaszczonego pasma metodą walcowania

| Lp. | OPIS | WZÓR | LITERA –TURA |
|-----|--|--|-----------------|
| 1 | Powierzchnia przekroju poprzecznego pasma | $S = bh - 0,18h^2$ dla r = 0,6h | [65] |
| 2 | Powierzchnia przekroju poprzecznego pasma | $S = bh - \left[\left(0,88 - \frac{\pi}{4} \right) + \left(\frac{0,12}{2,25 - 1,25\frac{h}{b}} \right) \right] h^2$ | [62] |
| 3 | Promień zarysu powierzchni swobodnej pasma | $r = \left(\frac{b - b_s}{4}\right) + \left(\frac{h^2}{4(b - b_s)}\right)$ | [65] |
| 4 | Promień zarysu powierzchni swobodnej w jednoprzepustowm płaszczeniu drutu | $r = 0,589 d_0^{0,983} e^{-1,059(1-\gamma_1)}$ | [52] |
| 5 | Względny promień zarysu powierzchni swobodnej pasma | $\rho = 0.5 + 0.361 \left(\frac{1}{\gamma_{c} - 1} \right) e^{-0.88 \left(\frac{1}{(\gamma_{c} - 1)} \right)}$ | [52] |
| 6 | Względny promień zarysu powierzchni swobodnej pasma | $\rho = 0.5 + \frac{0.006338}{\epsilon_{w}} \left(\frac{1}{(\gamma_{e} - 1)}\right) e^{-1.054 \frac{1}{(\gamma_{e} - 1)}}$ | [52] |

Promień powierzchni swobodnej (r) pasma płaszczonego można obliczyć za pomocą wzoru (3) z tablicy 3, znając wymiary przekroju poprzecznego pasma. Został on wyprowadzony z zależności geometrycznych przekroju poprzecznego pasma płaszczonego, po przyjęciu że promień powierzchni swobodnej jest łukiem koła.

Cytowana w pracy [52] zależność (4) w tablicy 3 Jurkovica i Pasagica, opisująca promień powierzchni swobodnej podczas jednoprzepustowego płaszczenia, jest zależnością empiryczną. We wzorze tym wartość promienia jest uzależniona od średnicy płaszczonego drutu i wartości gniotu. Z analizy wzoru wynika, że dla $\gamma_1 = 1$ promień powierzchni swobodnej pasma jest zawsze większy od 0,5d_o, co jest nieprawdziwe, gdyż w tym przy-padku r = 0,5 d_o.

Względny promień powierzchni swobodnej pasma płaszczonego ($\rho = r/h$), określony stosunkiem promienia powierzchni swobodnej do grubości pasma, opisują zależności (5) i (6) w tablicy 3. Wzory opracowano na podstawie wyników pomiarów cech geometrycznych przekroju poprzecznego pasma płaszczonego, otrzymanego z procesu ciągnienia drutu między rolkami walcowymi (D = 165 mm) oraz z walcowania między walcami o średnicy, której wielkości nie podaje autor [52]. Wzór (5) w porównaniu do wzoru (6) ujmuje dodatkowo wskaźnik kształtu walców (h_o /D). Dla ustalonych warunków płaszczenia drutów w metodzie ciągnienia w ciągadłach walcowych uzyskuje się mniejsze wartości poszerzenia pasma niż w metodzie walcowania [65]. Zatem, w tych samych warunkach płaszczenia, przy równym odkształceniu, uzyskiwane z obu procesów wartości szerokości styku metalu z walcami i szerokości pasma będą różne, a tym samym dokładność obliczenia promienia według wzorów (5) i (6) będzie mniejsza.

2.2. Odkształcenia w procesie płaszczenia drutów

Początki badań nad płaszczeniem drutów dotyczyły doboru początkowej średnicy drutu, gwarantującej w procesie płaszczenia uzyskanie żądanych wymiarów taśmy [5, 36, 61]. Pierwszy, a zarazem najprostszy wzór do obliczenia początkowej średnicy drutu do płaszczenia taśm [46] o określonych wymiarach ma postać:

$$d_{o} = \frac{h+b}{2} \tag{1}$$

Na podstawie praktyki stwierdzono, że wzór (1) może służyć tylko do obliczenia orientacyjnej wielkości średnicy drutu, gdyż w rzeczywistości wyznaczone z niego średnice drutu nie zapewniają uzyskania wymaganych wymiarów taśmy po płaszczeniu.

Davies [5], przy założeniu że stosunek obwodu przekroju taśmy do obwodu przekroju jest prawie stały, zmodyfikował wzór (1) do postaci:

$$_{o} = \frac{2(h+b)}{K_{p}\pi}$$
(2)

Wyznaczony doświadczalnie [5] współczynnik K_p przyjmuje wartości bliskie 1,2. Inne ujęcie zależności pomiędzy średnicą drutu a wymiarami taśmy podał Zlotnikov [65]. Jest to rozszerzona postać wzoru (1)

$$\mathbf{i}_{o} = \mathbf{C}(\mathbf{h} + \mathbf{b}) \tag{3}$$

We wzorze (3) współczynnik C uwzględnia wpływ parametrów procesu płaszczenia drutów i może przyjmować wartości w zakresie od 0,3 do 0,6. Większe wartości współczynnika $C = 0,32 \div 0,75$ cytowane są w pracy [62]. Otrzymano je przy płaszczeniu drutów ze stali węglowych, nisko- i wysokostopowych. Autorzy stwierdzają, że wartość współczynnika C zależy głównie od stosunku średnicy walców do średnicy drutu.

Weber [61] przy doborze średnicy drutu do płaszczenia uwzględnił wpływ średnicy walców:

$$\mathbf{d}_{o} = \mathbf{h} \left(\frac{\mathbf{b}}{\mathbf{h}} \right)^{\Psi} \tag{4}$$

Wykładnik ψ jest funkcją stosunku D/d_o oraz parametrów procesu płaszczenia na zimno. Wykładnik ψ , wyznaczony na podstawie wyników badań płaszczenia drutów (dla $10 \le D / d_o \le 50$), ze stali węglowych, nisko- i wysokostopowych [62] ma postać:

$$\psi = 0.98 - 0.161 \text{g} \frac{\text{D}}{\text{d}_{\circ}}$$
 (4a)

W praktyce przemysłowej stosunek D/d_o wynosi od 10 do 300. Z tego względu stosowanie wzoru (4) do doboru początkowej średnicy drutu do płaszczenia jest ograniczone. Inną postać zależności na wykładnik ψ występujący w równaniu (4) przedstawił Ruker [51]:

$$\psi = \left[\frac{0,825 + 0,013(n_p - 1) + 0,06\ln\left(\frac{h}{D}\right)}{1 - 0,13\frac{h}{d_p} - 0,0065\frac{d_o}{h}}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(4b)

Zależność (4b) w stosunku do postaci (4a) uwzględnia dodatkowo grubość taśmy oraz liczbę przepustów do jej uzyskania. Według Rukera [51] powinno to zapewnić większą dokładność doboru początkowej średnicy drutu do płaszczenia.

Zlotnikov [64] do płaszczenia drutów ze stali węglowych na taśmy o stosunku b/h > 5 do obliczenia początkowej średnicy drutu proponuje następującą zależność:

$$d_{o} = h \left\{ \frac{kb}{2h} + \left[\left(\frac{kb}{2h} \right)^{2} + 1,13 \frac{b}{h} - 1,13 \frac{kb}{h} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$
(5)

przy czym współczynnik k oblicza się ze wzoru:

k

$$= 1 - A \lg \frac{D}{d_a}$$
(5a)

Wartość stałej A dla A \in (0,33 ÷ 0,385) jest zależna od struktury i wytrzymałości na rozciąganie drutu oraz parametrów płaszczenia. Brak zależności do obliczenia wartości stałej A ogranicza stosowanie wzoru (5).

Równanie Webera (4) po prostych przekształceniach można przedstawić w postaci:

$$\beta_{\rm c} = \gamma_{\rm c}^{\frac{\psi-1}{\psi}} \tag{6}$$

wyrażającej zależność całkowitego współczynnika poszerzenia pasma od całkowitego współczynnika gniotu w warunkach płaszczenia na zimno. Jest ona podobna do wzoru Wusatowskiego [66, 67], opisującego zmiany poszerzenia w procesie walcowania. Zależność ta jest słuszna dla walcowania pasma płaskiego stałym gniotem na szerokości. Natomiast jest niesłuszna dla walcowania pasma okrągłego w pierwszym przepuście, kiedy to drut o przekroju kołowym jest odkształcany nierównomiernym gniotem na jego szerokości. Oprócz tego dla gniotu całkowitego $\gamma_c < 0,3$ obliczone z zależności (6) wartości współczynnika poszerzenia są zbyt duże w stosunku do wartości rzeczywistych [15].

Alternatywnie, do zależności umożliwiających dobór średnicy drutu do płaszczenia taśm opracowano nomogramy [42, 46, 49, 53, 54] do jej wyznaczenia. Przykładowy nomogram umożliwiający dobór średnicy drutu w zależności od wymiarów taśmy przedstawiono na rys. 4. Nomogramy konstruowano opierając się na zależnościach lub wynikach badań. Są one pomocą we wstępnym doborze początkowej średnicy drutu do płaszczenia, dla warunków w jakich nomogram został skonstruowany.



Rys. 4. Nomogram służący do wyznaczania początkowej średnicy drutu w procesie płaszczenia taśm między walcami o średnicy D = 100 mm [27]

Fig. 4. The nomogram used for determining the initial wire diameter in the process of flattening of strips with rolls of D = 100 mm diameter [27]

Inny kierunek przy doborze początkowej średnicy drutu do produkcji taśm metodą płaszczenia reprezentują prace: Bričko [1], Kobayashiego [29] i Zlotnikova [64]. Ich celem było określenie szerokości taśmy lub poszerzenia pasma w zależności od grubości taśmy, średnicy drutu i walców. Bričko [1] szerokość taśmy proponuje obliczyć według zależności:

$$b = 1,00493d_{o} + 0,165(d_{o} - h) + 1,659\frac{(d_{o} - h)^{2}}{d_{o}}$$
(7)

W przypadku płaszczenia drutów ze smarowaniem Kobayashi [29] zaleca następujący wzór do obliczenia szerokości taśmy:

$$b = 0,7854 \frac{d_o^2}{h} \left[1 - 15,8 \left(1 - \frac{h}{d_o} \right)^{2,25} \left(\frac{D}{d_o} \right)^{-0.82} \right] + 1,425h$$
(8)

dla stosunku D / $d_o = 30 \div 300$.

Przyjęcie liniowej zależności pomiędzy całkowitym względnym poszerzeniem (ε_{bc}) a ilorazem całkowitego względnego gniotu do całkowitego współczynnika gniotu ($\varepsilon_{hc}/\gamma_c$) dla danego stosunku D/d_o, przy płaszczeniu drutów ze stali wysokostopowych o wytrzymałości na rozciąganie powyżej 2500 MPa, umożliwiło Zlotnikovi [64] opracowanie zależności na poszerzenie pasma w postaci:

$$\beta_{e} = 1 + \left(\frac{1}{\gamma_{e}} - 1\right) \left[0,49 + 0,0086 \left(\frac{D}{d_{o}} - 114\right)\right]$$
(9)

Również na uwagę zasługuje wzór Zlotnikova [65], który umożliwia obliczenie wartości bezwzględnego poszerzenia pasma w kolejnych przepustach, podczas płaszczenia drutu okrągłego między walcami o średnicy $D \le 250$ mm na taśmy o szerokości b < 20 mm:

$$\Delta b = b_{n} - b_{n-1} = \frac{0.8(b_{n-1} - 0.18h_{n-1})\Delta h_{n}l_{d_{n-1}}}{b_{n-1}h_{n-1} + h_{n}l_{d_{n-1}}}$$
(10)

Wzór ten obowiązuje dla stosunku $b_i / h_i > 1,5$. Jego istotną wadą jest to, iż nie uwzględnia pierwszego przepustu, w którym występuje płaszczenie drutu nierównomiernym gniotem na szerokości.

Bazując na wzorach Wusatowskiego do obliczania poszerzenia [66, 67], autor na podstawie badań [15, 16] dotyczących płaszczenia drutów ze stali niskowęglowej opracował zależność opisującą zmiany całkowitego współczynnika poszerzenia od parametrów procesu w postaci:

$$\beta_{c} = \gamma_{c}^{-0,247 \, d_{0}^{-0,44} D^{0,25} \varepsilon_{h}^{0,14}}$$
(11)

Obliczone wg wzoru (11) wartości całkowitego współczynnika poszerzenia odbiegały od wartości zmierzonych nie więcej niż 10%.

Z badań własnych [17 ÷ 25] wynika, że w procesie płaszczenia drutów zależność między całkowitym współczynnikiem poszerzenia a odwrotnością całkowitego współczynnika gniotu

jest półlogarytmiczna (rys. 5). W układzie współrzędnych (ln($1/\gamma_c$), β_c) występuje zależność liniowa, którą wyrażono równaniem:

$$\beta_{\rm c} = 1 + H_{\rm s} \ln \frac{1}{\gamma_{\rm c}} \tag{12}$$

Wyznaczony doświadczalnie w [19] współczynnik Hs przedstawiono w postaci:

$$H_{s} = 0,277 \left(\ln \frac{D}{d_{o}} + 1,8\varepsilon_{h} - 2,2 \right)$$
(12a)

Po podstawieniu równania (12a) do (12) otrzymano wzór do obliczania poszerzenia pasma

$$\beta_{c} = 1 + 0.277 \left(\ln \frac{D}{d_{o}} + 1.8\varepsilon_{h} - 2.2 \right) \ln \frac{1}{\gamma_{c}}$$

$$\tag{13}$$

Z zależności wynika, że wartość całkowitego poszerzenia pasma zależy nie tylko od współczynnika gniotu całkowitego (γ_c) i wskaźnika D/d_o, ale również od przyjętej stałej wartości względnego gniotu w przepustach (ε_h).

Podczas płaszczenia drutów okrągłych poszerzenie pasma zależy nie tylko od parametrów walcowania, lecz również od gatunku stali i jej struktury, a zatem od własności stali [20, 24, 25]. Z badań [12, 36, 64, 65] wynika, że druty ze stali węglowej poszerzają się bardziej, gdy zawierają więcej węgla. Wpływ własności materiału na poszerzenie pasma w procesie płaszczenia drutów ze stali węglowej (C = $0,2 \div 0,85\%$) po patentowaniu wyznaczył autor w pracy [20]. W pracy tej wykazano, że istnieje zależność liniowa pomiędzy współczynnikiem H_s, występującym we wzorze (12), a wytrzymałością na rozciąganie drutów (R_m).

Wpływ parametrów procesu płaszczenia i wytrzymałości na rozciąganie drutów ($R_m = 600 \div 1340$ MPa) na poszerzenie pasma podczas wieloprzepustowego walcowania stałym gniotem opisano w pracy autora [20] związkiem w postaci :

$$\beta_{e} = 1 + 0,263 \left(\ln \frac{D}{d_{e}} + 1,31\varepsilon_{h} + 0,00045R_{m} - 2,275 \right) \ln \frac{1}{\gamma_{e}}$$
(14)

Proces płaszczenia drutów okrągłych może być realizowany z naciągiem i przeciwciągiem. Wpływ naciągu (σ_1) i przeciwciągu (σ_0) na poszerzenia uwzględniony został przez Koroleva i Nikiforova, a który cytowany jest w pracy [32]:

$$B_{e} = 1 + 3,33 \frac{1,108 - \varepsilon_{he}^{2}}{1 - \varepsilon_{he}} \left[1 - \left(\frac{\sigma_{o}}{\sigma_{i}} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}} + \left(1 - \varepsilon_{he} \right) \left(1 + 0,524\varepsilon_{he} - 0,262\varepsilon_{he}^{2} \right)$$
(15)

Również w pracy [62] przytoczono wzory Brički i Deribasa do obliczania poszerzenia z uwzględnieniem naciągu i przeciwciągu. Dla pierwszego przepustu bezwzględne poszerzenie ww. autorzy obliczają według wzoru:

$$\Delta b = 0.165 (d_{o} - h_{1}) \left(1 - 10 \frac{d_{o} - h_{1}}{d_{o}} \right) \left(1 - 1.4 \frac{\sigma_{o}}{\sigma_{po}} - 0.21 \frac{\sigma_{1}}{\sigma_{p1}} \right)$$
(16)

zaś dla kolejnych przepustów:

۸

$$\mathbf{b} = \mathbf{b}_{\mathbf{p}} \left[\left(\frac{\mathbf{h}_{i}}{\mathbf{h}_{i+1}} \right)^{\frac{1-\mathbf{g}}{\mathbf{g}}} - 1 \left[1 - \left(\sigma_{\mathbf{p}\mathbf{o}} - 0, 19\sigma_{\mathbf{p}\mathbf{i}} \right) / \sigma_{\mathbf{p}\mathbf{s}} \right]$$
(17)

gdzie:

$$g = 1,564 - 0,179 \ln \frac{D}{d_0}$$
(17a)

$$\sigma_{ps} = 0.4\sigma_{po} + 0.6\sigma_{p1} \tag{17b}$$

W trakcie płaszczenia drutu im większy występuje przeciwciąg i naciąg, tym pasmo doznaje mniejszego poszerzenia. Jeżeli we wzorze (17) nie uwzględnimy naciągu i przeciwciągu, to po prostym jego przekształceniu otrzymamy zależność analogiczną do wzoru (6) Webera czy też Wusatowskiego [66], do których krytycznie ustosunkowano się wcześniej.

2.3. Wpływ parametrów procesu płaszczenia drutów na poszerzenie pasma

Poszerzenie pasma podczas płaszczenia drutów okrągłych metodą wieloprzepustowego walcowania na zimno zależy od parametrów walcowania oraz gatunku stali, jej struktury po obróbce cieplnej i stopnia umocnienia, a zatem od jej własności. Znajomość wpływu wymienionych parametrów na poszerzenie stwarza możliwość opracowania zależności ułatwiającej przewidywanie poszerzania od zmian parametrów walcowania. Ponieważ poszerzenie jest ściśle związane z wydłużeniem pasma, znajomość tej zależności ma praktyczne znaczenie dla prawidłowego projektowania technologii i sterowania parametrami procesu walcowania.

Na poszerzenie pasma podczas płaszczenia drutów okrągłych metodą walcowania wpływają następujące parametry:

• całkowity współczynnik gniotu (γ_c) – doświadczenia [16, 17, 18, 64] wykazują, że podczas wieloprzepustowego płaszczenia drutów okrągłych ze wzrostem wartości odwrotności całkowitego współczynnika gniotu (rośnie gniot) zwiększa się wartość całkowitego współczynnika poszerzenia, a więc rośnie poszerzenie pasma (rys. 5). W kolejnych przepustach płaszczone pasmo zmniejsza swoją grubość, a zwiększa szerokość. Ze wzrostem wskaźnika kształtu ($\delta = b/h$) pasma rosną opory płynięcia metalu w kierunku poprzecznym, a maleją w kierunku wzdłużnym. W wyniku tego maleje przyrost całkowitego współczynnika poszerzenia ze wzrostem odwrotności całkowitego współczynnika gniotu.



Rys. 5. Wpływ odwrotności całkowitego współczynnika gniotu na całkowity współczynnik poszerzenia podczas płaszczenia drutów o różnych średnicach, ze stali w gat. D6-2, gniotem $\varepsilon_h = 15\%$ między walcami o średnicy D =160 mm [17]

Fig. 5. The effect of inverse of the total draft coefficient on the total widening coefficient during flattening the D6-2 steel wires of different diameters with $\varepsilon_{h}=15\%$ draft using rolls of D = 160mm diameter [17]

• gniot względny w przepuście (ε_b) – podczas jednoprzepustowego płaszczenia drutów metodą walcowania wpływ gniotu na poszerzenie pasma można przedstawić za pomocą wskaźnika poszerzenia ($k_b = \Delta b/\Delta h$) w funkcji gniotu względnego. Wyniki badań [48], po opracowaniu statystycznym przez autora, przedstawiono na rys. 6. Krzywa charakteryzująca zmiany wskaźnika poszerzenia (rys. 6) wykazuje maksimum przy gniocie wynoszącym około 50%. Przy płaszczeniu małymi gniotami wartość wskaźnika poszerzenia intensywnie wzrasta, co oznacza, że pasmo bardziej się poszerza, niż wydłuża. Odwrotnie przy stosowaniu dużych gniotów maleje wskaźnik poszerzenia, pasmo bardziej się wydłuża, niż poszerza.



Rys. 6. Zależność wskaźnika poszerzenia od gniotu względnego Fig. 6. The dependence of widening coefficient upon relative draft

W procesie wieloprzepustowego płaszczenia drutów stałą wartością gniotu w przepustach pasmo poszerza się bardziej, gdy jest płaszczone większym gniotem względnym (rys. 7). Zwiększenie gniotu w przepuście powoduje wzrost długości łuku styku metalu z walcami (tabl.2, wzory 1 i 2) i wzrost oporu tarcia w kierunku walcowania. W wyniku tego metal odkształca się bardziej w kierunku poprzecznym, a zatem wzrasta poszerzenie (rys. 7) [14+17, 19+22].



- Rys. 7. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od średnicy walców podczas płaszczenia stałym gniotem (ϵ_b) drutu o średnicy d_o = 3 mm ze stali w gat. D6-2 dla różnych wartości całkowitego współczynnika gniotu (γ_c) [19]
- Fig. 7. The dependence of total widening coefficient upon rolls diameter during flattening with $(\varepsilon_{\rm h})$ constant draft of $d_o = 3$ mm wire diameter; wire made of D6-2 steel for n different values of (γ_c) total draft coefficient [19]

• początkowa średnica drutu (d_0) – im większa początkowa średnica drutu płaszczonego, tym mniejsze poszerzenie w warunkach D = const i γ_c = const (rys. 8) [15, 46, 62, 65].



Rys. 8. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od średnicy drutu dla różnych wartości całkowitego współczynnika gniotu (γ_c) podczas wieloprzepustowego walcowania gniotem 15% między walcami o średnicy D = 60 mm. Gatunek stali D6-2 [15]

Fig. 8. The dependence of total widening coefficient on wire diameter for various values of total draft coefficient (γ_c) during multi pass rolling with 15% draft between rolls of D = 60 mm diameter. D6-2 steel grade [15]

W pracy autora [15], na podstawie uzyskanych wyników z badań płaszczenia drutów o różnej średnicy ze stali niskowęglowej odkształcanych stałą wartością gniotu w przepustach, wpływ początkowej średnicy drutu na jej poszerzenie wyrażono zależnością:

$$\beta_{c} = \gamma_{c}^{-k_{d}d_{o}^{-H_{d}}}$$
(18)

Współczynniki k_d , H_d są zależne od średnicy walców (D) i gniotu w przepuście (ϵ_h). Wartości współczynników, przedstawione w tablicy 4, obliczono metodą najmniejszych kwadratów.

Tablica 4

Wartości współczynników k_d i H_d w równaniu (18) dla 0,2 $\leq \gamma_c \leq 0,5$ oraz $2 \leq d_o \leq 6$ mm stali w gat.D6-2 [15]

| D | ε _b | k _d | H _d | R |
|-----|----------------|----------------|----------------|-------|
| mm | % | | | |
| 60 | 15 | 0,669 | 0,882 | 0,990 |
| | 30 | 0,696 | 0,765 | 0,982 |
| 100 | 15 | 0,819 | 0,717 | 0,981 |
| | 30 | 0,810 | 0,596 | 0,970 |
| 160 | 15 | 0,780 | 0,539 | 0,958 |
| | 30 | 0,749 | 0,393 | 0,918 |
| 210 | 15 | 0,742 | 0,428 | 0,935 |
| | 30 | 0,790 | 0,397 | 0,913 |

• średnica walców (D) – duży wpływ na poszerzenie ma średnica walców, ponieważ ze wzrostem średnicy wskaźnik poszerzenia zwiększa się. Przy założeniu że pozostałe parametry procesu są stałe, wzrost średnicy walców powoduje zwiększenie długości kotliny odkształcania i wzrost oporu tarcia w kierunku walcowania. W wyniku tego opór płynięcia metalu wzdłuż pasma zwiększa się, rosną naprężenia wzdłużne, wydłużenie maleje, a rośnie poszerzenie [10, 15, 21, 36, 62, 65]. Wpływ średnicy walców na poszerzenie pasma w procesie wieloprzepustowego płaszczenia drutów ze stali niskowęglowej, stałą wartością gniotu w przepustach ujmuje zależność empiryczna przedstawiona przez autora [15]:

$$\beta_{\rm c} = \gamma_{\rm c}^{-k_{\rm D} {\rm D}^{\rm H_{\rm D}}} \tag{19}$$

Współczynniki k_D , H_D są zależne od walcowanej średnicy drutu i stałej wartości gniotu w przepustach. Wartości współczynników, przedstawione w tablicy 5, obliczono metodą najmniejszych kwadratów.

Tablica 5

Wartości współczynników k_D i H_D w równaniu (19) dla

 $0,2 \le \gamma_c \le 0,5$ oraz $60 \le D \le 210$ mm stali w gat. D6-2 [15]

| do | ε _h | k _D | H _D | R |
|----|----------------|----------------|----------------|-------|
| mm | % | | | |
| 2 | 15 | 0,096 | 0,335 | 0,875 |
| | 30 | 0,123 | 0,302 | 0,851 |
| 3 | 15 | 0,044 | 0,452 | 0,926 |
| | 30 | 0,061 | 0,407 | 0,930 |
| 4 | 15 | 0,019 | 0,582 | 0,970 |
| | 30 | 0,032 | 0,508 | 0,946 |
| 5 | 15 | 0,010 | 0,680 | 0,974 |
| | 30 | 0,018 | 0,601 | 0,965 |
| 6 | 15 | 0,002 | 0,948 | 0,969 |
| | 30 | 0,008 | 0,737 | 0,918 |

• wskaźnik D/d_o – jest wielkością charakterystyczną, decydującą o wielkości poszerzenia. Ze wzrostem tego stosunku zwiększa się poszerzenie [4, 19 ÷ 25, 61, 62]. Gdy wyższe wartości przyjmuje wskaźnik D/d_o , to rosną wartości współczynnika H_s (rys. 9) i zwiększa się poszerzenie zgodnie z zależnością (13).



Rys. 9. Wpływ wskaźnika D/d₀ na współczynnik H₅ w procesie płaszczenia drutów o średnicy 2 ≤ d₀ ≤ 6 mm ze stali w gat. D6-2 walcowanych gniotem ε_h = 15% w przepuście [19]

Fig. 9. The effect of D/d_o index on H_s coefficient during flattening of the wires of $2 \le d_o \le 6$ mm diameter, made of D6-2 steel rolled with $\varepsilon_h = 15\%$ draft in a roll pass [19]

• prędkość walcowania (v) – w badaniach jednoprzepustowego płaszczenia drutów [54] stwierdzono, że wpływ prędkości na poszerzenie pasma jest nieznaczny i można go pominąć. Opracowane statystycznie przez autora wyniki badań [54] przedstawiono na rys. 10. Uzyskana zależność współczynnika β od ln (1/ γ) dla prędkości walcowania w zakresie 0,005 \div 0,021 m/s jest liniowa w postaci:

$$B = 1 + 0.5817 \ln(1/\gamma)$$
, $R^2 = 0.984$ (20)

Zależność ta potwierdza, że w badanym zakresie zmienności prędkości walcowania występuje brak jej wpływu na poszerzenie.



Rys.10. Zależność współczynnika poszerzenia od logarytmicznej odwrotności współczynnika gniotu dla różnych prędkości walcowania podczas jednoprzepustowego płaszczenia drutów ośrednicy d_o = 1,57 mm ze stali w gat.1H18N9

Fig.10. The dependence of widening coefficient upon logarithmic inverse of a draft coefficient for different rolling velocities during single pass flattening of the wires of d =1.57mm diameter, made of 1H18N9 steel • współczynnik tarcia (μ) – prezentowane w literaturze wzory do obliczania poszerzenia pasma podczas płaszczenia drutów o przekroju kołowym nie uwzględniają wpływu tarcia. Pomp, Hohle i Lueg [46] porównując wartości poszerzenia występującego podczas płaszczenia drutów ze stali wysokowęglowych między walcami o różnych średnicach w wieloprzepustowym walcowaniu bez smarowania i ze smarowaniem (olej kostny) stwierdzili, że poszerzenie z udziałem smarowania jest nieznacznie mniejsze, zwłaszcza gdy wartość całkowitego gniotu względnego jest większa od 0,40.

Wpływ smarowania na poszerzenie pasma w procesie płaszczenia drutów ze stali węglowych badano w pracy Grochowskiego i Witka [12]. Wyniki badań [12] opracowane przez autora przedstawiono na rys. 11 oraz w tablicy 6. Związek pomiędzy współczynnikiem poszerzenia a współczynnikiem gniotu opisano zależnością (12), dla której metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono współczynniki H_s i H_o (tablica 6). Z rys. 11 wynika, że w procesie płaszczenia drutów ze smarowaniem olejem rzepakowym pasmo doznaje mniejszego poszerzenia niż bez smarowania.



- Rys.11. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od całkowitego współczynnika gniotu przy płaszczeniu drutów między walcami D = 157 mm bez smarowania (s) i ze smarowaniem olejem rzepakowym (o). Stal o zaw. 0,18 % C
- Fig. 11. The dependence of total widening coefficient (β_c) from total draft coeff.(γ_c) while flattening the wire in rolls of D = 157 mm diameter without lubrication (s) and with rape seed oil lubrication (o) steel containing 0.18% C

W celu potwierdzenia istnienia wpływu smarowania w stosunku do procesu prowadzonego bez smarowania na poszerzenie pasma płaszczonego przeprowadzono test istotności dla hipotezy o równości dwu współczynników regresji liniowej, zwany testem równoległości [11]. Założono, że obie funkcje regresji (12) opisujące zmianę współczynnika poszerzenia od odwrotności współczynnika gniotu dla tego samego stosunku D/d_o mają takie same współczynniki regresji (H_s i H_o), tj. weryfikowano hipotezę Ho:H_s = H_o wobec hipotezy alternatywnej H₁: H_s \neq H_o. Porównując obliczoną wartość statystki t z wartością krytyczną t_k dla poziomu istotności α = 0,05 przy 10 stopniach swobody (tablica 6), otrzymano nierówność t < t_k. Oznacza to, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy Ho o równoległości prostych regresji i należy uznać, że poszerzenie pasma w procesie płaszczenia drutów nie zależy od warunków tarcia dla zakresu zmienności objętych badaniami.

Tablica 6

Współczynniki prostych regresji równania (12) oraz test Studenta

| Zawartość | Średnica | Wymiary | taśmy | Współczyn | Współczynnik nach. | | denta |
|-----------|----------------------|----------------|----------------|------------|-------------------------------|-------|----------------|
| węgla w | drutu d _o | h _n | b _n | półprostej | półprostej regresji | | krytycz. |
| stali % | mm | mm | mm | Hs | H _s H _o | | t _k |
| | 2,49 | 0,78 | 4,23 | 0,565 | | 1,975 | 2,228 |
| 0,14 | 2,49 | 0,65 | 4,17 | | 0,496 | | |
| | 1,50 | 0,41 | 2,80 | 0,629 | | 1,316 | 2,228 |
| | 1,50 | 0,40 | 2,65 | | 0,558 | | |
| | 2,49 | 0,81 | 4,20 | 0,592 | | 1,352 | 2.228 |
| 0,89 | 2,49 | 0,64 | 4,41 | | 0,547 | | |
| | 1,50 | 0,47 | 2,82 | 0,714 | | 0,432 | 2,228 |
| | 1,50 | 0,40 | 2,94 | | 0,687 | | |

Zlotnikov [64] i Poliakov [49] wpływ tarcia na poszerzenie uzależniają od stosunku średnicy walców do średnicy drutu (D/d_o). Stwierdzają, że wartości poszerzenia pasma są takie same w procesie płaszczenia drutów bez smarowania i ze smarowaniem, gdy stosunek $D/d_o < 30 \div 45$. Dla wyższych wartości stosunku D/d_o poszerzenie pasma jest nieznacznie mniejsze, gdy płaszczenie drutów odbywa się ze smarowaniem (rys. 12).



Rys. 12. Zależność poszerzenia od całkowitego gniotu przy płaszczeniu drutów o średnicy d_o = 1 mm ze stali węglowej (0,83% C) podczas walcowania: bez smarowania (•) i ze smarowaniem olejem przemysłowym (o) między walcami o średnicy 1- D = 10 mm i 2- D = 45 mm [49]

Fig. 12. The dependence of widening upon total draft during flattening the wire of d_o = 1 mm diameter made of carbon steel (0.83%C) by rolling: without lubrication (•) and with industrial oil lubrication (o) with rolls of 1-D = 10mm and 2-D = 45mm diameter [49]

Również autor w pracach [16, 17, 22] wykazał, że wielkość poszerzenia pasma w procesie płaszczenia drutów ze smarowaniem niewiele się różni od poszerzenia pasma płaszczongo, gdy nie stosowano smarowania (rys. 13).



- Rys. 13. Zależność współczynnika H_s , H_e , H_o od stosunku D/d_o podczas płaszczenia drutów o średnicy $2 \le d_o \le 5 \text{ mm ze stali } D6 - 2 \text{ stałym } \epsilon_h = 15\%$: bez smarowania - (s), ze smarowaniem emulsją wodno-olejową - (e) lub olejem - (o) [16]
- Fig. 13. The dependence of H_s , H_e , H_o coefficient upon D/d_o ratio during flattening the wire of $2 \le d_o \le 5$ mm diameter, made of D6-2 steel with constant $\varepsilon_h = 15\%$: without lubrication (s), with water-oil emulsion lubrication (e) or oil lubrication- (o) [16]

Poliakov [49], płaszcząc druty w jednym przepuście bez smarowania i ze smarowaniem, wyznaczył średnie wartości współczynnika tarcia w warunkach ślizgania się walców po paśmie. Dla zakresu zmienności parametrów procesu (rys. 14) wyznaczone wartości współczynnika tarcia są w przedziale 0,08 do 0,09. Wartości te są bliskie wartościom współczynnika tarcia 0,073 do 0,089, jakie uzyskali w swych badaniach Lueg i Pomp [36], Celikov [3],



Rys. 14. Zależność gniotu względnego od wskaźnika D/d_o i współczynnika tarcia podczas płaszczenia drutów ze stali niskowęglowych (pkt. 1,2,3,6,7) i łożyskowych (pkt. 4,5) przy walcowaniu bez smarowania (pkt. 1,2,4,5), ze smarowaniem olejem przemysłowym (pkt. 3) lub smarem stałym (pkt. 6,7) [49]

Fig. 14. The dependence of relative draft upon D/d_o ratio and friction coefficient during flattening the wires made of low-carbon steel (points no 1, 2, 3, 6, 7) and bearing steel (points no 4, 5) during rolling without lubrication (points no 1, 2, 4, 5), with industrial oil lubrication (point no 3) or with solid oil (points no 6, 7) [49]

Pietrov i Morienko [45] oraz Guang [11] przy walcowaniu wąskich taśm z prędkością do 1 m/s, bez smarowania. Stwierdzić zatem można, że współczynnik tarcia przy jednoprzepustowym płaszczeniu drutu ze smarowaniem, jak i bez smarowania ma wartość bliską 0,08 do 0,09 i nie wpływa znacząco na poszerzenie dla zakresu zmienności badanych parametrów procesu. Potwierdzają to wyniki otrzymywania pasma o tej samej szerokości przy tym samym gniocie podczas jednoprzepustowego płaszczenia drutów w różnych warunkach smarowania [2, 22, 65].

• własności drutu – pierwsze badania [36] wykazały, że druty ze stali węglowej o wyższej zawartości węgla w procesie płaszczenia w tych samych warunkach doznają większego poszerzenia (rys.15).

W przypadku płaszczenia drutów ze stali wysokostopowych (1H18H9, H17, 2H13) wartość poszerzenia pasma zależy od zawartości węgla, chromu i niklu w stali. Skołyszewski i Łuksza [53, 54] wykazali, że poszerzenie zwiększa się, gdy rośnie ich procentowa zawartość w stali.

Smirnov [56] płaszcząc druty o różnej strukturze, otrzymanej po obróbce cieplnej, wykazał, że struktura materiału ma znaczący wpływ na wskaźnik poszerzenia (rys. 16). W







- Rys.16. Zależność wskaźnika poszerzenia od całkowitego gniotu względnego podczas płaszczenia drutu o średnicy d_o = 1,4 mm o różnej strukturze (stał Y7A wg GOST): 1 - perlityczna, 2 - perlitycznosorbityczna, 3 - sorbityczna (po patentowaniu), 4 - sorbityczna (po hartowaniu i odpuszczaniu) i 5 sorbityczna - umocniona [56]
- Fig.16. The dependence of widening index upon the relative draft during flattening the wire of $d_o = 1.4 \text{ mm}$ diameter and of different structure (Y7A steel according to GOST standard): 1 - pearlitic, 2 - pearliticsorbitic, 3 - sorbitic (after patenting), 4 - sorbitic (after hardening and tempering) and 5 - sorbiticstrengthened [56]

swych badaniach Zlotnikov [64] potwierdza, że płaszczone druty o strukturze sorbitycznej doznają większego poszerzenia niż druty o strukturze perlitycznej. Również ze wzoru (14) autora (pkt. 2.2.) wynika, że druty ze stali węglowych o wyższej wytrzymałości na rozciąganie podczas płaszczenia w tych samych warunkach doznają większego poszerzenia.

• naciąg i przeciwciąg w procesie płaszczenia (σ_o , σ_1) – zastosowanie naciągu i przeciwciągu przy płaszczeniu drutów wywołuje dodatkowo w paśmie naprężenia rozciągające. Skutkiem tego jest zmiana kształtu kotliny odkształcenia. Strefy odpowiadające za poszerzenie maleją, w następstwie czego zmniejsza się poszerzenie płaszczonego pasma w stosunku do poszerzenia pasma płaszczonego bez naciągów [62]. Naciąg powoduje minimalne zmniejszenie poszerzenia. Odwrotnie przeciwciąg znacząco zmniejsza poszerzenie zwiększając wydłużenie [62].

3. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

Warunkiem prawidłowego projektowania procesu wieloprzepustowego płaszczenia drutów metodą walcowania na zimno wąskich taśm o naturalnie zaokrąglonych brzegach jest znajomość mechanizmu płynięcia metalu, a zwłaszcza zależności zmian poszerzenia w funkcji odkształcenia dla przyjętych warunków odkształcania. W procesie walcowania, do opisu zmian wymiarów przekroju poprzecznego pasma, wykorzystywany jest związek pomiędzy współczynnikami odkształcenia, najczęściej poszerzenia w funkcji gniotu i parametrów procesu.

Cytowane w literaturze [1, 5, 14, 16, 17, 19, 20, 29, 62, 64, 65] wzory (4, 5, 6 ÷ 11, 13 ÷ 17) do obliczania szerokości taśmy lub poszerzenia w funkcji warunków odkształcania, podczas płaszczeniu drutu okrągłego metodą walcowania, ujmują najczęściej podstawowe wymiary taśmy, średnicę drutu płaszczonego, średnicę walców i wielkość gniotu. W pracach autora [15, 19, 20, 24 i 25] wykazano, że poszerzenie pasma również zależy od wartości gniotu stosowanego w przepustach i własności wytrzymałościowych drutów. Wpływ naprężeń, pochodzących od sił naciągu i przeciwciągu działających podczas płaszczenia pasma, na poszerzenie ujęto we wzorach (15, 16 i 17).

W procesie płaszczenia drutów wartości poszerzenia obliczone według ww. wzorów nie zapewniają dostatecznej dokładności, co spowodowane jest brakiem uwzględnienia sposobu płynięcia materiału w kolejnych przepustach.

W trakcie płaszczenia drutów okrągłych metodą walcowania można wyróżnić dwie podstawowe różniące się między sobą fazy odkształcania [18, 24 i 25]. W fazie:

- I płaszczenie przekroju kołowego odbywa się z nierównomiernym (malejącym) gniotem na szerokości pasma,
- II pasmo płaskie o stałej grubości i zaokrąglonych powierzchniach bocznych, otrzymane po płaszczeniu drutu w I fazie, podlega dalszemu płaszczeniu równomiernym gniotem na szerokości.

Na podstawie rezultatów prac własnych $[13 \div 25]$, dotyczących procesu płaszczenia drutów metodą walcowania na zimno, sformułowano następującą tezę pracy:

Podczas płaszczenia drutów okrągłych metodą wieloprzepustowego walcowania występują dwie fazy odkształcania. Faza I, w której pasmo o przekroju kołowym jest płaszczone nierównomiernym gniotem na szerokości i faza II, w której pasmo płaskie jest płaszczone równomiernym gniotem na szerokości. Całkowite poszerzenie można obliczyć korzystając z zasady superpozycji funkcji opisujących poszerzenie dla kolejnych faz odkształcania.

Pełny opis kształtu przekroju poprzecznego pasma po walcowaniu określony jest wielkością: szerokości maksymalnej, szerokości styku metalu z walcami oraz promieniem powierzchni swobodnej.

Zasadniczym celem pracy było:

- wyjaśnienie przebiegu zmian poszerzenia dla I i II fazy odkształcania w procesie płaszczenia na zimno, drutu o przekroju kołowym, ze stali węglowych, bez smarowania,
- ilościowe powiązanie tych zmian z parametrami procesu, jak również z własnościami drutu w oparciu o opracowane modele opisujące odkształcanie pasma,
- ilościowe opisanie zarysu kształtu poprzecznego pasma w procesie płaszczenia drutu,
- przeprowadzenie analizy płynięcia metalu w procesie wieloprzepustowego płaszczenia drutu.

Dla udowodnienia tezy pracy i osiągnięcia założonego celu przyjęto następujący zakres pracy:

- opracowanie funkcji opisujących poszerzenie dla I i II fazy płaszczenia drutu oraz dla obu faz łącznie,
- ilościowy opis wpływu podstawowych parametrów procesu na poszerzenie dla I i II fazy płaszczenia,
- opracowanie matematycznego związku na poszerzenie uwzględniającego wpływ parametrów procesu płaszczenia i własności wytrzymałościowych drutów,
- ilościowy opis wpływu podstawowych parametrów procesu na zmianę promienia zarysu kształtu powierzchni swobodnej i szerokości styku metalu z walcem w procesie płaszczenia drutu,
- przeprowadzenie numerycznej symulacji procesu płaszczenia drutów metodą elementów skończonych (MES).

Opracowana zależność opisująca zmiany poszerzenia podczas płaszczenia drutów powinna uwzględniać kolejne fazy odkształcania, istotne parametry technologiczne procesu oraz własności materiału drutów. Powyższe zagadnienie ma duże znaczenie praktyczne, bowiem jego rozwiązanie będzie podstawą do prawidłowego projektowania procesu płaszczenia i opracowania algorytmu doboru parametrów początkowych drutu dla zadanych wymiarów taśmy.

4. BADANIA WŁASNE

4.1. Funkcje opisujące poszerzenie pasma o przekroju kołowym w procesie płaszczenia metodą walcowania

Proces płaszczenia drutów o przekroju kołowym metodą walcowania charakteryzuje złożony przebieg odkształcania. Proces może być prowadzony w jednym przepuście (drut okrągły walcowany jest w pasmo płaskie z zaokrąglonymi brzegami) lub w kilku przepustach (w drugim i kolejnych przepustach następuje walcowanie pasma płaskiego). W pierwszym przepuście występuje duża niejednorodność odkształcenia pasma, gdy drut walcowany jest między walcami z nierównomiernym gniotem na szerokości (rys. 2). W drugim i kolejnych przepustach (rys. 3) można przyjąć, że odkształcanie pasma odbywa się z równomiernym gniotem na szerokości.



Rys. 17. Zależność wskaźnika poszerzenia od gniotu względnego przy płaszczeniu drutów z dwóch różnych gatunków stali

Fig. 17. The dependence of widening index upon the relative draft while flattening wires made of two different types of steel

W jednoprzepustowym płaszczeniu drutów zależność $k_b = f(\varepsilon_h)$ charakteryzująca wpływ gniotu na wskaźnik poszerzenia przedstawiono na rys. 6, pkt.2.3. Dla danego wskaźnika D/d_o

zależność ma maksimum w punkcie odpowiadającym gniotowi względnemu równemu około 0,55 [$1/\gamma = 2,22$; ln ($1/\gamma$) = 0,8]. Podobne zależności $k_b = f(\epsilon_h)$ otrzymano we wstępnych badaniach własnych podczas płaszczenia drutów z różnych gatunków stali (rys. 17). Otrzymane krzywe posiadają maksimum przy gniocie względnym 0,47 i 0,5.

Dla procesu jednoprzepustowego płaszczenia drutów zmiany poszerzenia w zależności od gniotu analizowano w pracy [48]. Na podstawie zakresu badań, w tym zmienności parametrów procesu oraz braku analitycznego opisu zależności badanego zjawiska, nie sformułowano jednoznacznych wniosków. Wyniki badań [48], po opracowaniu przez autora, przedstawiono na rys. 18. W układzie współrzędnych [ln(1/ γ), β] rozkład punktów wskazuje, że zależność β od ln(1/ γ) można opisać dwoma równaniami pierwszego stopnia, których wykresami są dwa odcinki prostych o różnym współczynniku kątowym. Punkt o odciętej ln(1/ γ) = 0,702 (1/ γ = 2,018) jest punktem wspólnym obu prostych, dla którego zachodzi równość współczynnika poszerzenia.



Rys. 18. Zależność współczynnika poszerzenia od ln $(1/\gamma)$ w jednoprzepustowym płaszczeniu drutu o średnicy $d_0 = 6.45$ mm między walcami D = 158,7 mm. Gat. stali 10

Fig. 18. The dependence of widening coefficient upon $\ln(1/\gamma)$ during single pass flattening of wire of $d_o = 6,45$ mm diameter with rolls of D = 158.7mm diameter. Steel type - 10

Analizując zależności: $k_b = f(\varepsilon_h) i \beta = f[\ln(1/\gamma)]$ w przedziale gniotu względnego do wartości 0,5, stwierdza się duże podobieństwo charakteru zmian poszerzenia od odkształcenia. Mianowicie, ze wzrostem gniotu względnego do wartości 0,5 poszerzenie intensywnie wzrasta, pasmo się poszerza kosztem wydłużenia. Odwrotnie, pasmo doznaje znacznego wydłużenia przy niewielkim wzroście poszerzenia, kiedy drut odkształcany jest gniotem względnym większym niż 0,5 (rys. 18). W praktyce walcowniczej w pierwszym przepuście nie stosuje się tak dużych gniotów, gdyż pasmo poszerza się niejednorodnie, w wyniku czego uzyskuje się zmienną szerokość na jego długości. Przedstawione na rys. 17 i 18 zależności opisujące zmiany poszerzenia od gniotu względnego lub odwrotności współczynnika gniotu wykorzystano przy opracowaniu funkcji poszerzenia dla jednoprzepustowego płaszczenia drutów [24]. Zmiany zależności β od ln(1/ γ) opisuje funkcja typu:



której wykres przedstawia rys. 19.



Rys. 19. Przedstawienie graficzne zależności (21) opisującej poszerzenie pasma w procesie jednoprzepustowego płaszczenia drutu

Fig. 19. Graphic presentation of dependence (21) describing widening of the band in the process of single pass flattening of the wire

Wykres składa się więc (rys. 19) z odcinka prostej i półprostej o znacząco różnych kątach nachylenia α_{j1} i α_{j2} do osi odciętej. W pierwszym przedziale dla odciętej [0, ln(1/ γ_{1m}] przyrosty poszerzenia ze wzrostem gniotu są znacząco duże w stosunku do małych

przyrostów w drugim przedziale o odciętej $[\ln(1/\gamma_{1m}), \ln(1/\gamma)]$. Odcięta o wartości $\ln(1/\gamma_{1m})$ jest punktem granicznym odkształcenia dla obu przedziałów. Dla gniotu względnego o wartości bliskiej 0,5 występuje maksimum wskaźnika poszerzenia, a jednocześnie od punktu tego następuje zmiana charakteru oddziaływania między poszerzeniem a wydłużeniem.

Zmiany całkowitego poszerzenia w fazie walcowania pasma płaskiego stałym gniotem w pojedynczych przepustach przedstawiono na rys. 20. W układzie współrzędnych $[\ln(\gamma_1/\gamma), \beta_{cp}]$ rozkład punktów wskazuje, że β_{cp} w zależności od $\ln(\gamma_1/\gamma)$ można opisać równaniem pierw-szego stopnia lub nieco zmodyfikowaną zależnością (12), której wykresem jest półprosta.



- Rys. 20. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od ln (γ_1/γ) w procesie wieloprzepustowego walcowania pasma płaskiego między walcami o średnicy D = 100 mm stałym gniotem w pojedynczych przepustach $\epsilon_h = 0,22$
- Fig. 20. The dependence of total widening coefficient upon $ln(\gamma_1 / \gamma)$ in the process of multi pass rolling of a flat band by rolls of D = 100mm diameter when draft is invariable in single passes $\varepsilon_h = 0.22$

Zmiany całkowitego poszerzenia od parametrów technologicznych procesu wieloprzepustowego płaszczenia pasma płaskiego, stałym gniotem w pojedynczych przepustach, opisano funkcją:

$$\beta = 1 + \frac{\beta_{cp} - 1}{\ln \frac{1}{\gamma_c} - \ln \frac{1}{\gamma_1}} \ln \frac{\gamma_1}{\gamma} \qquad dla \qquad \frac{1}{\gamma_1} \le \frac{1}{\gamma} \le \frac{1}{\gamma_c}$$
(22)

której wykres przedstawiono na rys. 21.



Rys. 21. Przedstawienie graficzne funkcji (22) opisującej zmiany poszerzenia od odkształcania w procesie wieloprzepustowego płaszczenia pasma płaskiego

Fig. 21. Graphic presentation of function (22) showing the widening changes upon deformation in the process of multi pass flattening of a flat band

Funkcję opisującą zmiany poszerzenia w zależności od parametrów technologiczych procesu wieloprzepustowego płaszczenia drutów metodą walcowania, bez działania na pasmo sił pochodzących od naciągu i przeciwciągu, opracowano na podstawie doświadczeń i wyników prac własnych [13 ÷ 25]. Wykorzystując funkcje (21) i (22) oraz stosując zasadę superpozycji funkcji, opisano zmiany poszerzenia w procesie wieloprzepustowego płaszczenia drutów w następującej postaci:

$$\beta = \begin{cases} 1 + \frac{\beta_1 - 1}{\ln \frac{1}{\gamma_1}} \ln \frac{1}{\gamma} & \text{dla} & 1 \le \frac{1}{\gamma} \le 2\\ \beta_1 + \frac{\beta_c - \beta_1}{\ln \frac{1}{\gamma_c} - \ln \frac{1}{\gamma_1}} \left(\ln \frac{1}{\gamma} - \ln \frac{1}{\gamma_1} \right) & \text{dla} & \frac{1}{\gamma_1} < \frac{1}{\gamma} \le \frac{1}{\gamma_c} \end{cases}$$
(23)

której wykres w układzie współrzędnych $[\ln(1/\gamma), \beta]$ przedstawiono na rys. 22.



Rys. 22. Przedstawienie graficzne zależności (23) opisującej poszerzenie pasma w wieloprzepustowym płaszczeniu drutu metodą walcowania

Fig. 22. Graphic presentation of dependence (23) showing the band widening in the process of multi pass flattening applying the rolling method

Punkt przecięcia $\left(\ln \frac{1}{\gamma_1}, \beta_1\right)$ dwóch prostych jest punktem odpowiadającym odkształcaniu

drutu w pierwszym przepuście (faza I) i początkowego odkształcania pasma płaskiego w kolejnych przepustach (faza II). Punkt ten w zależności od wartości odkształcenia w pierwszym przepuście przemieszcza się po półprostej, która jest określona w przedziale o odciętej [0, $ln(1/\gamma_{1m})$]. Przy odkształcaniu w I fazie współczynnik kątowy H_j półprostej równa się współczynnikowi kątowemu przy płaszczeniu jednoprzepustowym:

$$H_{j} = tg\alpha_{jl} = \frac{\beta_{l} - 1}{\ln \frac{1}{\gamma}}$$
(24)

W II fazie wieloprzepustowego płaszczenia pasma paskiego współczynnik kątowy półprostej wynosi:

$$H_{p} = tg\alpha_{p} = \frac{\beta_{c} - \beta_{1}}{\ln\frac{1}{\gamma_{c}} - \ln\frac{1}{\gamma_{1}}} = \frac{\beta_{cp} - 1}{\ln\frac{1}{\gamma_{c}} - \ln\frac{1}{\gamma_{1}}}$$
(25)

Po podstawieniu do równania (23) zależności (24) i (25) oraz po przekształceniu otrzymano następującą zależność funkcyjną:

$$\beta = \begin{cases} 1 + H_{j} \ln \frac{1}{\gamma} & \text{dla} & 1 \le \frac{1}{\gamma} \le 2\\ \beta_{1} + H_{p} \ln \frac{\gamma_{1}}{\gamma} & \text{dla} & \frac{1}{\gamma_{1}} < \frac{1}{\gamma} \le \frac{1}{\gamma_{c}} \end{cases}$$
(26)

Współczynniki H_j i H_P są zależne od parametrów technologicznych procesu, początkowej średnicy drutu i jego własności.

4.2. Funkcje opisujące zarys kształtu przekroju poprzecznego pasma w procesie płaszczenia drutów metoda walcowania

Kształt przekroju poprzecznego pasma w procesie jednoprzepustowego płaszczenia drutu między walcami przedstawiono na rys. 23. Kształt pasma, a tym samym wymiary, przy pozostałych parametrach stałych, zależą od wielkości odkształcenia w przepuście. W procesie wieloprzepustowego walcowania drutu wymiary pasma są zależne od całkowitego gniotu oraz pojedynczych gniotów w przepuście. W pracach [36, 52, 54, 62, 65] na podstawie dobrze



Rys. 23. Kształt poprzeczny pasma w jednoprzepustowym płaszczeniu drutu Fig. 23. Lateral shape of the band in the process of single pass flattening of the wire

45

przeprowadzonych pomiarów promienia powierzchni swobodnej pasma (r_i), uzyskanego w jedno- i wieloprzepustowym walcowaniu, stwierdzono, że łuk koła o określonym promieniu bardzo dobrze oddaje zarys brzegu zaokrąglenia.

Po przyjęciu, iż zarys swobodnej powierzchni pasma w jednoprzepustowym (i = 1) płaszczeniu drutu okrągłego stanowi łuk koła, z zależności trygonometrycznych wynika, że promień r_1 jest równy:

$$r_{i}^{2} = \left(\frac{h_{i}}{2}\right)^{2} + \left(r_{i} - \frac{b_{i} - b_{si}}{2}\right)^{2}$$
(27)

a po przekształceniu równania (27) otrzymuje się:

$$r_{1} = \frac{1}{4} \left[\frac{h_{1}^{2}}{b_{1} - b_{s1}} + (b_{1} - b_{s1}) \right]$$
(28)

Wprowadzając do wzoru (28) wyrażenie: b_{s1}/b_1 , charakteryzujące stosunek szerokości styku metalu z walcem do szerokości pasma po przepuście, otrzymuje się:

$$h_{1} = \frac{1}{4} \left| \frac{h_{1}^{2}}{b_{1} \left(1 - \frac{b_{s1}}{b_{1}} \right)} + b_{1} \left(1 - \frac{b_{s1}}{b_{1}} \right) \right|$$
(29)

Wyrażając wymiary pasma po przepuście (h_1 i b_1) za pomocą początkowej średnicy drutu do płaszczenia:

$$\mathbf{h}_1 = \gamma_1 \mathbf{d}_0 \qquad \mathbf{i} \qquad \mathbf{b}_1 = \beta_1 \mathbf{d}_0 \tag{30}$$

oraz po ich podstawieniu do wzoru (29) i przekształceniach, promień zarysu powierzchni swobodnej opisuje zależność:

$$r_{1} = \frac{d_{o}}{4} \left| \frac{\gamma_{1}^{2}}{\beta_{1} \left(1 - \frac{b_{s1}}{b_{1}} \right)} + \beta_{1} \left(1 - \frac{b_{s1}}{b_{1}} \right) \right|$$
(31)

We wzorze (31) przy zadanym odkształceniu wielkością nieznaną jest stosunek b_{s1}/b_1 oraz współczynnik poszerzenia β_1 .

W drugiej fazie płaszczenia drutu między walcami jest płaszczone pasmo o stałej grubości i zaokrąglonych brzegach (rys. 24). Po drugim przepuście dla i = 2, promień powierzchni swobodnej pasma, zgodnie ze wzorem (29), wyrażono zależnością:

$$\mathbf{r}_{2} = \frac{1}{4} \left[\frac{\mathbf{h}_{2}^{2}}{\mathbf{b}_{2} \left(1 - \frac{\mathbf{b}_{s2}}{\mathbf{b}_{2}} \right)} + \mathbf{b}_{2} \left(1 - \frac{\mathbf{b}_{s2}}{\mathbf{b}_{2}} \right) \right]$$



Rys. 24. Kształt poprzeczny pasma po i – tym przepuście w II fazie płaszczenia drutu Fig. 24. Lateral shape of the band after i-pass in the second phase of wire flattening

Podstawiając do wzoru (32) za:

$$h_2 = h_1 \gamma_2 = d_0 \gamma_1 \gamma_2 = d_0 \gamma_{c2}$$

i

 $b_2 = h_1 \beta_2 = d_0 \beta_1 \beta_2 = d_0 \beta_{c2}$

oraz po jego przekształceniu otrzymuje się zależność w postaci:

46

47

(33)

(32)

$$a_{2} = \frac{d_{o}}{4} \left[\frac{\gamma_{e2}^{2}}{\beta_{e2} \left(1 - \frac{b_{s2}}{b_{2}} \right)} + \beta_{e2} \left(1 - \frac{b_{s2}}{b_{2}} \right) \right]$$
(34)

Przyjmując tok obliczeń dla określenia promienia pasma po przepuście i = n, analogiczny do i =2, uzyskano związek opisujący promień powierzchni swobodnej pasma w postaci:

$$r_{n} = \frac{h_{n}^{2}}{b_{n} \left(1 - \frac{b_{n}}{b_{n}}\right)} + b_{n} \left(1 - \frac{b_{m}}{b_{n}}\right)$$
(35)

Wymiary pasm h_n i b_n wyrażone za pomocą początkowej średnicy drutu i odkształcenia wynosza:

$$\mathbf{h}_{n} = \mathbf{h}_{n-1} \, \boldsymbol{\gamma}_{n} = \mathbf{d}_{o} \, \boldsymbol{\gamma}_{1} \boldsymbol{\gamma}_{2} \boldsymbol{\gamma}_{3} \dots \, \boldsymbol{\gamma}_{n-1} \, \boldsymbol{\gamma}_{n} = \mathbf{d}_{o} \, \boldsymbol{\gamma}_{cn}$$
(36)

 $b_n = b_{n-1} \beta_n = d_o \beta_1 \beta_2 \beta_3 \dots \beta_{n-1} \beta_n = d_o \beta_{cn}$

gdzie całkowite współczynniki gniotu i poszerzenia są równe:

$$\gamma_{cn} = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \dots \gamma_{n-1} \gamma_n \tag{37}$$

 $\beta_{cn} = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \dots \beta_{n-1} \beta_n$

Wstawiając zależność (36) do wzoru (35), po przekształceniach otrzymuje się zależność:

$$r_{n} = \frac{d_{o}}{4} \left| \frac{\gamma_{cn}^{2}}{\beta_{cn} \left(1 - \frac{b_{sn}}{b_{n}} \right)} + \beta_{cn} \left(1 - \frac{b_{sn}}{b_{n}} \right) \right|$$
(38)

opisującą promień powierzchni swobodnej w wieloprzepustowym płaszczeniu drutu okrągłego. We wzorze (38) podobnie jak we wzorach (31) i (34), przy zadanym całkowitym gniocie, wielkościami nieznanymi są : stosunek b_{sn}/b_n i całkowity współczynnik poszerzenia β_{cn} .

4.3. Druty stosowane w badaniach oraz ich własności

Badano druty o średnicy $d_0 = 2 \div 5$ mm ze stali węglowych w gatunku: C4D, C20D, C56D i C88D wg DIN EN 10016-2 wytworzone w warunkach przemysłowych. Druty ze stali w gat. C4D były w stanie po wyżarzaniu, a ze stali w gat.: C20D, C56D i C88D - po patentowaniu. Skład chemiczny badanych stali przedstawiono w tablicy 7.

Tablica 7

Skład chemiczny stali użytych do badań według analizy wytopowej

| Gatunek stali wg | do | Zav | vartość pierv | viastków, 🧐 | 10 | - |
|---|------|------|---------------|-------------|-------|-------|
| DIN EN 10016-2 | mm | С | Mn | Si | P | S |
| 1.1 | 1,98 | - | | | | |
| C4D | 2,95 | 0,06 | 0,40 | 0,04 | 0,010 | 0,040 |
| | 3,91 | | | - | | |
| | 4,92 | | | | | |
| | 1,97 | 0,22 | 0,57 | 0,21 | 0,021 | 0,017 |
| C20D | 3,27 | 0,20 | 0,58 | 0,16 | 0,010 | 0,023 |
| | 3,73 | 0,21 | 0,57 | 0,19 | 0,011 | 0,018 |
| | 2,22 | 0,56 | 0,60 | 0,23 | 0,012 | 0,015 |
| C56D | 2,94 | 0,55 | 0,59 | 0,14 | 0,012 | 0,025 |
| | 3,74 | 0,57 | 0,63 | 0,19 | 0,028 | 0,021 |
| and the second se | 1,97 | 0,84 | 0,66 | 0,21 | 0,006 | 0,004 |
| C88D | 3,24 | 0,85 | 0,62 | 0,22 | 0,013 | 0,022 |
| | 4,13 | 0,85 | 0,62 | 0,22 | 0.013 | 0.022 |

Druty patentowano w warunkach przemysłowych w piecu komorowym przelotowym wielostrefowym zgodnie z technologią patentowania stosowaną w Zakładach Lin i Drutu "DRUMET SA" Włocławek. Parametry obróbki cieplnej drutów zestawiono w tablicy 8. Druty ze stali w gat.C4D wyżarzano w piecu kołpakowym. Parametry wyżarzania podano w tablicy 8.

i

Tablica 9

Tablica 8

| Parametry obrobk | cieplnej | drutów ze sta | ili węglowych |
|------------------|----------|---------------|---------------|
|------------------|----------|---------------|---------------|

| Gatunek stali wg | do | Parametr | y wyżarzar | ia |
|---|------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| DIN EN 10016-2 | mm | T _w , °C | t _w , h | chłodz. |
| C4D | 1,98 2,95 3,92 4,92 | 740-760 | 4 | powolne |
| Gatunek stali wg | đo | Parametry | v patentowa | nia |
| DIN EN 10016-2 | mm | T _A . ℃ | t,s | T _{ko} , °C |
| | 1,97 | 909 | 50 | 473 |
| C20D | 3,27 | 923 | 84 | 450 |
| and the second se | 3,73 | 928 | 102 | 446 |
| | 2,22 | 895 | 55 | 490 |
| C56D | 2,94 | 903 | 75 | 478 |
| | 3,74 | 910 | 102 | 467 |
| | 1,97 | 881 | 50 | 510 |
| C88D | 3,24 | 891 | 84 | 492 |
| | 4,13 | 900 | 118 | 478 |

W stanie wyjściowym badane druty po obróbce cieplnej (tablica 8) różniły się podstawowymi własnościami. Średnie własności drutów:

- wytrzymałość na rozciąganie (R m),
- wyraźną lub umowną granicę plastyczności (R e; R 0,2),
- wydłużenie względne (A 100),
- przewężenie (Z),

wyznaczono w statycznej próbie rozciągania, którą przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 4469 zgodnie z PN- 80/H-04310. Własności drutów po obróbce cieplnej przedstawiono w tablicy 9. Własności badanych drutów ze stali węglowych

| Znak | do | W | Własności mechaniczne | | | | |
|-------|------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------|------|--|
| stali | mm | R _m , MPa | R _e , MPa | R _e /R _m | A100,% | Ζ,% | |
| | 1,98 | 418,9 | 301,2 | 0,72 | 34,2 | 69,8 | |
| C4D | 2,95 | 359,5 | 249,1 | 0,69 | 40,5 | 71,0 | |
| | 3,91 | 336,2 | 229,7 | 0,68 | 36,0 | 74,6 | |
| | 4,92 | 327,2 | 218,9 | 0,67 | 35,4 | 72,3 | |
| | 1,97 | 678,7 | 555,7 | 0,82 | 13,4 | 65,0 | |
| C20D | 3,27 | 623,3 | 493,1 | 0,79 | 17,2 | 65,7 | |
| | 3,73 | 610,7 | 490,4 | 0,80 | 15,2 | 68,5 | |
| | 2,22 | 1021,9 | 693,3* | 0,68 | 10,7 | 59,4 | |
| C56D | 2,94 | 997,2 | 638,2* | 0,64 | 10,6 | 58,5 | |
| | 3,74 | 1033,1 | 638,7* | 0,62 | 11,1 | 61,2 | |
| | 1,96 | 1296,4 | 919,1* | 0,71 | 10,3 | 45,0 | |
| C88D | 3,24 | 1372,1 | 885,1* | 0,65 | 10,1 | 45,6 | |
| | 4,13 | 1383,3 | 941,0* | 0,68 | 9,7 | 46,1 | |

* - symbol oznacza umowną granicę plastyczności

Własności drutów ze stali średnio- i wysokowęglowych po patentowaniu zależą od procentowej zawartości węgla i parametrów obróbki cieplnej [37]. Dla danego składu chemicznego stali wytrzymałość na rozciąganie maleje ze wzrostem średnicy drutu. Analizując dla gatunków stali (C56D i C88D) średnią wytrzymałość na rozciąganie w zależności od średnicy drutu (tablica 9), należy stwierdzić, że nie jest zachowany spadek wytrzymałości na rozciąganie ze wzrostem średnicy drutu. Brak spadku można wiązać z niewielką zmianą zawartości podstawowych pierwiastków w stali danego gatunku, z którego wykonano druty (tablica 7).

4.4. Metodyka badania poszerzenia w procesie płaszczenia drutów

Badania płaszczenia drutów metodą walcowania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych na zespołach jednoklatkowych typu duo. Do walcowania użyto walcarek laboratoryjnych o średnicy walców D = 60 mm i D = 100 mm oraz walcarek przemysłowych o średnicy walców D = 160 mm i D = 210 mm. Prędkości walcowania odpowiednio wynosiły: 0,19 m/s; 0,044 m/s; 0,085m/s i 0,2 m/s.

Druty ze stali w gat.C4D (tablica 7) płaszczono między walcami D = 60, 100, 160 i210 mm bez smarowania, według przyjętego planu gniotów:

- w jednoprzepustowym płaszczeniu
- względny gniot $\varepsilon_h = 5 \div 50\%$ narastająco co $5 \div 8\%$,
- w wieloprzepustowym płaszczeniu
- stały względny gniot w przepuście $\varepsilon_{\rm h} = 15\%$ lub $\varepsilon_{\rm h} = 30\%$,
- całkowity względny gniot $\varepsilon_{hc} = 80 \div 85 \%$.

Druty po patentowaniu ze stali w gat.: C20D, C56D i C88D (tablica 7) płaszczono między walcami o średnicy D = 60 mm i D =100 mm bez smarowania, zgodnie z przyjętym planem gniotów. Program badań płaszczenia drutów przedstawiono na rys. 25.

W badaniach wieloprzepustowego płaszczenia drutów przyjęte w przepuście wartości stałego gniotu $\varepsilon_h = 15\%$ lub $\varepsilon_h = 30\%$ są realnym gniotem stosowanym w produkcji taśm płaszczonych. Wartość gniotu w pierwszym przepuście jest z reguły nieco większa niż w pozostałych. Całkowity względny gniot $\varepsilon_{hc} = 80 \div 85\%$ przy płaszczeniu drutów ze stali niskowęglowej zapewniał otrzymywanie taśm bez pęknięć na brzegach. Przy płaszczeniu tą samą wielkością gniotu taśm ze stali średnio- lub wysokowęglowej obserwowano występowanie drobnych pęknięć na brzegach lub znacznych pęknięć w osi taśmy, których bezpośrednią przyczyną są występujące naprężenia. Z tych względów wartość całkowitego gniotu ograniczono do wartości około 80%.

We wstępnych badaniach jednoprzepustowego płaszczenia drutów gniotem $\varepsilon_h > 50\%$ stwierdzono występowanie niejednorodności poszerzania się pasma na długości. Z tych względów w badaniach ograniczono wartość gniotu do 50%.

Płaszczono druty o długości ok. 500 mm w stanie prostym. Każdy wariant płaszczenia drutów powtarzano dwukrotnie. Przed płaszczeniem druty i walce odtłuszczano. Początkową średnicę (d_0) drutów mierzono dwukrotnie w kierunkach prostopadłych względem siebie.

DRUTY STALOWE Patentowane Wyżarzane Gat C4D Gat. C20D Gat.C56D Gat.C88D d. mm d. mm d. mm d. mm 1.98: 2.95: 3.91: 4.92 1.97: 3.27: 3.73 2.22: 2.94: 3.74 1.97: 3.24: 4.13 Badania własności drutów Płaszczenie drutów w walcach o śred. D mm Plaszczenie drutów w walcach o śred. D mm 60 i 100 60: 100: 160: 210 W II fazie stały gniot w przepustach sh % W I fazie gniot w przepuście E. % 15 lub 30 5 do 50 narastajaco co 5 do 8 Pomiary grubości i szerokości Pomiary grubości i szerokości pasma po walcowaniu oraz szerokości styku pasma z walcem : h1; b1; i bsi mm h, x b, mm Obliczanie współczynników gniotu i poszerzenia Poszukiwanie zależności dla danego gat. stali drutów oraz opis związku $b_{si}/b_i = f(\gamma, d_o, D)$ $\beta_i = f(1/\gamma_i) dla d_o = const, D = const$

Rys. 25. Schemat programu badań płaszczenia drutów ze stali węglowych metodą walcowania

Fig. 25. The scheme of examination programme of flattening the wires made of carbon steel using the rolling method

Po płaszczeniu drutów na długości pasma mierzono grubość (h_i) i szerokość (b_i) w trzech przekrojach na jego długości: w środku i w jednej czwartej od początku i końca pasma. Pomiary wykonano suwmiarką elektroniczną z dokładnością 0,01 mm. Współczynniki poszerzenia (β) i gniotu (γ) obliczono z zależności:

- dla płaszczenia jednoprzepustowego

$$B_1 = \frac{\mathbf{b}_1}{\mathbf{d}_o}$$
 i $\gamma_1 = \frac{\mathbf{h}_1}{\mathbf{d}_o}$

- dla płaszczenia wieloprzepustowego

• w pierwszym przepuście według zależności (39),

• w kolejnych przepustach przy płaszczeniu pasma płaskiego dla i ≥ 2 :

$$\beta_{cpi} = \frac{b_i}{b_i} \qquad i \qquad \gamma_{cpi} = \frac{h_i}{h_1}$$
(40)

(39)

• całkowity współczynnik poszerzenia (β_c) i gniotu (γ_c):

$$\beta_{\rm c} = \frac{{\rm b}_{\rm a}}{{\rm d}_{\rm c}}$$
 i $\gamma_{\rm c} = \frac{{\rm h}_{\rm a}}{{\rm d}_{\rm c}}$ (41)

Dodatkowo, po jednoprzepustowym płaszczeniu drutów ze stali w gatunku C4D, na próbkach walcowanych różnym gniotem, mierzono szerokość styku metalu z walcem (b_{si}). Pomiary te wykonano na mikroskopie warsztatowym z dokładnością do 0,001 mm.

W procesie jednoprzepustowego walcowania drutów okrągłych związek pomiędzy współczynnikiem poszerzenia a odwrotnością współczynnika gniotu opisano zależnością:

$$\beta = 1 + H_j \ln \frac{1}{\gamma}$$
(42)

a dla procesu wieloprzepustowego walcowania pasma płaskiego:

$$\beta_{cp} = \beta_{c} - \beta_{1} + 1 = 1 + H_{p} \ln \frac{1}{\gamma_{cp}}$$
(43)

4.5. Wpływ parametrów walcowania na poszerzenie w procesie płaszczenia drutów po wyżarzaniu ze stali niskowęglowej w gatunku C4D

W zależności (26) opisującej odkształcanie drutów w procesie płaszczenia metodą walcowania występują nieznane współczynniki H_j i H_p, które są zależne od parametrów procesu walcowania, początkowych wymiarów wsadu i własności materiału drutów. Próbę ich analitycznego opisu podjęto na podstawie wyników badań płaszczenia w jedno- i wieloprzepustowym walcowaniu drutów. Uzyskane po danym przepuście wyniki pomiarów grubości i szerokości pasma przeliczono zgodnie ze wzorami (39) i (40), obliczając współczynniki poszerzenia i gniotu. Dla badanych wariantów procesu jednoprzepustowego walcowania drutów obliczone wartości współczynnika poszerzenia w zależności od odwrotności współczynnika gniotu aproksymowano funkcją (42). Podobnie, uzyskane w procesie wieloprzepustowego walcowania pasma płaskiego, zmiany współczynnika poszerzenia w zależności od odwrotności współczynnika gniotu aproksymowano funkcją (43). Współczynniki H_j i H_p dla badanych wariantów płaszczenia drutów obliczono metodą najmniejszych kwadratów. Uzyskane wyniki aproksymacji dla jednoprzepustowego płaszczenia drutów przedstawiono w tablicy 10.

W procesie płaszczenia drutów między walcami danej średnicy wartość współczynnika H_j zmniejsza się ze wzrostem średnicy drutu (tablica 10). Odwrotnie, rośnie wartość współczynnika H_j, gdy drut danej średnicy jest płaszczony między walcami o większej średnicy. Wpływ odwrotności współczynnika gniotu na współczynnik poszerzenia w procesie płaszczenia drutów różnej średnicy przedstawiono na rys. 26 i 27. W danych warunkach płaszczenia drutów obserwuje się ciągły wzrost współczynnika poszerzenia w zależności od odwrotności współczynnika gniotu. Podczas płaszczenia stałym gniotem (stały współczynnik gniotu) druty o mniejszej średnicy doznają większego poszerzenia (rośnie wartość współczynnika poszerzenia). Z analizy wyników zamieszczonych w tablicy 10 wynika, że współczynnik H_j zależny jest od średnicy płaszczonego drutu oraz średnicy walców, a zatem od wskaźnika D/d_o.

Tablica 10

Wyniki aproksymacji funkcją (42) zmian współczynnika poszerzenia w zależności od odwrotności współczynnika gniotu w procesie jednoprzepustowego płaszczenia gniotem względnym

 $0 \le \epsilon_h \le 0,5$ drutów ze stali w gatunku C4D

| d _o | D | Hj | R ² |
|----------------|-----|-------|----------------|
| mm | mm | | |
| 1,98 | | 0,544 | 0,994 |
| 2,95 | 60 | 0,524 | 0,985 |
| 3,91 | - | 0,444 | 0,993 |
| 4,92 | | 0,421 | 0,991 |
| 1,98 | | 0,665 | 0,997 |
| 2,95 | 100 | 0,577 | 0,993 |
| 3,92 | | 0,539 | 0,965 |
| 4,92 | | 0,502 | 0,975 |
| 1,98 | | 0,717 | 0,984 |
| 2,95 | | 0,615 | 0,965 |
| 3,92 | 160 | 0,573 | 0,964 |
| 4,92 | | 0,555 | 0,992 |
| 1,98 | | 0,742 | 0,993 |
| 2,95 | | 0,658 | 0,989 |
| 3,92 | 210 | 0,607 | 0,988 |
| 4,92 | | 0,579 | 0,987 |



- Rys. 26. Zależność współczynnika poszerzenia od odwrotności współczynnika gniotu podczas płaszczenia drutów różnej średnicy ze stali w gat.C4D między walcami D =100 mm
- Fig. 26. The dependence of widening coefficient upon the inverse of draft coefficient during flattening the wires of various diameters, made of C4D steel grade in rolls of D = 100 mm diameter



- Rys. 27. Zależność współczynnika poszerzenia od odwrotności współczynnika gniotu podczas płaszczenia drutów różnej średnicy ze stali w gat. C4D między walcami D = 210 mm
- Fig. 27. The dependence of widening coefficient upon the inverse of draft coefficient during flattening the wires of various diameters, made of C4D steel grade in rolls of D = 210mm diameter

Zgodnie z wcześniejszymi pracami [15,18] zmiany współczynnika H_j, w zależności od wskaźnika D/d_o aproksymowano funkcją typu:

$$H_j = B_1 + B_2 \ln \frac{D}{d_a}$$

$$\tag{44}$$

Współczynniki B_1 i B_2 równania (44) obliczono metodą najmniejszej kwadratów, a wyniki zestawiono w tablicy 11.

Tablica 11

Wyniki analizy regresji dla równania (44)

| Współcz równa | Współczynniki Prawdopodobieństwo równania (44) [n=16, α = 0,05] | | Współ. korelacji | spół. Test F elacji | | |
|------------------|---|----------------|---------------------|------------------------|-------|-----------------------|
| B _l | B ₂ | \mathbf{p}_1 | P2 | R ² | F | р |
| 0,070 | 0,142 | 0,06 | 5x10 ⁻¹⁰ | 0,942 | 227,1 | 4,8x10 ⁻¹⁰ |

Zależność opisującą zmiany współczynnika H_j dla płaszczenia drutów w jednoprzepustowym walcowaniu przedstawiono w postaci:

$$H_{j} = 0,07 + 0,142 \ln \frac{D}{d_{z}}$$
(45)

Wyniki testu istotności dla współczynników regresji równania (44) zestawiono w tablicy 11. Widać, że stała B₁ i zmienna $\ln(D/d_o)$ istotnie oddziałują na H_i, gdyż p₁ i p₂ są mniejsze od przyjetego poziomu istotności $\alpha = 0.05$. Wartości testu F świadcza o dobrym dopasowaniu równania (45) opisującego badaną cechę.

Zależność współczynnika H_i od wskaźnika D/d_o przedstawiano na rys. 28. Im wieksza wartość stosunku D/do, tym współczynnik H_i przyjmuje wyższe wartości, a więc zgodnie z zależnością (42) pasmo doznaje większego poszerzenia.



Rys. 28. Zależność współczynnika H_i od wskaźnika D/d, w procesie jednoprzepustowego płaszczenia drutów ze stali w gat. C4D dla $0.5 \le \gamma_0 \le 1$

Fig. 28. The dependence of H_i coefficient upon D/d_o factor in the process of single pass flattening of wires made of C4D steel grade for $1 \le \gamma_0 \le 0.5$

Po podstawieniu zależności (45) do (42) otrzymano wzór do obliczania współczynnika poszerzenia w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów okrągłych na zimno bez smarowania w postaci:

$$\beta = 1 + (0.07 + 0.142 \ln \frac{D}{d_0}) \ln \frac{1}{\gamma}$$
(46)

W wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego między walcami różnej średnicy, pojedynczym gniotem względnym 0,15 lub 0,30 w przepustach, związek pomiędzy całkowitym współczynnikiem poszerzenia (β_{cp}) a odwrotnością całkowitego współczynnika gniotu ($1/\gamma_{cp}$) opisano funkcją (43). Dla badanych wariantów płaszczenia współczynnik H_p obliczono metoda najmniejszych kwadratów. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 12.

Tablica 12

Wyniki analizy regresji zależności (43) dla wieloprzepustowego płaszczenia pasma płaskiego ze stali w gatunku C4D

h, b D H, R² εь

| | mm | mm | | 70 | | |
|----|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 1,72 | 2,21 | 0,399 | 0,994 | | |
| -1 | 2,60 | 3,16 | 60 | 15 | 0,291 | 0,986 |
| | 3,45 | 4,13 | | | 0,214 | 0,991 |
| | 4,24 | 5,19 | | | 0,183 | 0,928 |
| | 1,48 | • 2,43 | | | 0,424 | 0,990 |
| ĺ | 2,18 | 3,35 | 60 | 30 | 0,342 | 0,982 |
| 1 | 2,76 | 4,45 | | 1.200 | 0,275 | 0,992 |
| | 3,48 | 5,48 | | 1 | 0,235 | 0,998 |
| ľ | 1,72 | 2,18 | | _ | 0,511 | 0,995 |
| ľ | 2,51 | 3,20 | 100 | 15 | 0,430 | 0,988 |
| ľ | 3,42 | 4,14 | | | 0,360 | 0,978 |
| ſ | 4,29 | 5,20 | | | 0,308 | 0,973 |
| ſ | 1,40 | 2,42 | | | 0,608 | 0,995 |
| ſ | 2,10 | 3,49 | 100 | 30 | 0,511 | 0,993 |
| ſ | 2,75 | 4,62 | | _ | 0,402 | 0,963 |
| ſ | 3,47 | 5,78 | | | 0,344 | 0,992 |
| ſ | 1,48 | 2,36 | | | 0,618 | 0,997 |
| I | 2,59 | 3,18 | 160 | 15 | 0,524 | 0,996 |
| ſ | 3,44 | 4,13 | | | 0,456 | 0,991 |
| ſ | 4,50 | 5,12 | | | 0,381 | 0,989 |
| ſ | 1,41 | 2,47 | | | 0,695 | 0,990 |
| ſ | 2,18 | 3,48 | 160 | 30 | 0,567 | 0,999 |
| ſ | 2,78 | 4,62 | | | 0,485 | 0,990 |
| | 3,46 | 5,82 | | | 0,459 | 0,992 |
| Γ | 1,53 | 2,35 | | | 0,658 | 0,994 |
| Ī | 2,42 | 3,30 | 210 | 15 | 0,555 | 0,994 |
| ſ | 3,24 | 4,29 | _ | | 0,472 | 0,997 |
| | 4,05 | 5,35 | - | | 0,436 | 0,999 |
| | 1,41 | 2,52 | | | 0,728 | 0,995 |
| | 2,29 | 3,35 | 210 | 30 | 0,642 | 0,997 |
| | 3,00 | 4,44 | | | 0,532 | 0,999 |
| Γ | 3.69 | 5.60 | | | 0.480 | 0.999 |

W wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego (o wskaźniku kształtu pasma $\delta = 1,2$ ÷1,3 i 1,6÷1,7) gniotem względnym 0,15 lub 0,30 między walcami o danej średnicy (D = 60, 100, 160 i 210 mm) wartości współczynnika H_p zależą od gniotu względnego w przepustach i początkowej grubości pasma (tablica 12). Współczynnik H_p maleje ze wzrostem grubości pasma, gdy pasmo płaszczone jest między walcami o większej średnicy. Wartości współczynnika H_p rosną, gdy pasmo płaskie o tym samym wskaźniku kształtu jest płaszczone w walcach o wiekszej średnicy.

Dla różnych parametrów procesu płaszczenia pasma płaskiego wpływ odwrotności całkowitego współczynnika gniotu na całkowity współczynnik poszerzenia przedstawiono na rys. 29 ÷ 33.



Rys. 29. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu w wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego między walcami D = 60 mm gniotem względnym 0,15
Fig. 29. The dependence of total widening coefficient upon the inverse of a total draft coefficient during multi pass flattening of a flat band using rolls of D = 160mm with 15% relative draft



Rys. 30. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu w wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego między walcami D = 160 mm gniotem względnym 0,15
Fig. 30. The dependence of total widening coefficient upon the inverse of total draft coefficient while multi pass flattening of a flat band in rolls of D =160mm with 15% relative draft



- Rys. 31. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu w wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego między walcami o średnicy 160 mm gniotem względnym 0,30
- Fig. 31. The dependence of total widening coefficient upon the inverse of total draft coefficient during multi pass flattening of a flat band in rolls of D = 160mm diameter with 30% relative draft



Rys. 32. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu w wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego między walcami D = 210 mm gniotem względnym 0,15 (punkty puste) lub 0,30 (punkty pełne)

Fig. 32. The dependence of total widening coefficient upon the inverse of total draft coefficient during multi pass flattening of a flat band in rolls of D = 210mm with 15% draft (hollow points) or 30% draft (full points)



- Rys. 33. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu w wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego o wskaźniku kształtu δ =1,46 ÷ 1,66 gniotem względnym 0,30 dla różnych średnic walców
- Fig. 33. The dependence of total widening coefficient upon the inverse of total draft coefficient during multi pass flattening of a flat band featuring profile factor of $\delta = 1.46 \pm 1.66$ applying 30% draft for various diameters of rolls

Charakter zmian całkowitego współczynnika poszerzenia w zależności od odwrotności współczynnika gniotu jest uzależniony od początkowych wymiarów pasma (wskaźnika kształtu pasma), średnicy walców i gniotu w przepuście (rys.29 ÷ 33). Płaszczone pasmo o zbliżonym początkowym wskaźniku kształtu tym bardziej się poszerza, im mniejsza jest jego początkowa grubość (rys.29÷31). Przy porównywalnych parametrach płaszczenia zwiększa się poszerzenie pasma, gdy w przepustach stosowany jest gniot o większej wartości (rys.32). Podobny wpływ na poszerzenie wywiera średnica walców. Jej wzrost przy płaszczeniu stałym gniotem pasma o stałym wskaźniku kształtu powoduje zwiększenie poszerzenia (rys.33).

Korzystając z opracowanych wyników badań (tablica 12), zależność współczynnika H_p od wskaźnika D/h₁ przy płaszczeniu pasma płaskiego stałym gniotem w przepuście przedstawiono na rys. 34. W zakresie wskaźnika 16< D/h₁< 40, niezależnie od wskaźnika kształtu pasma i gniotu w przepuście, współczynniki H_p są porównywalne. Powyżej wartości wskaźnika D/h₁ > 40, wartości współczynnika H_p są większe, gdy pasmo jest płaszczone $\varepsilon_h = 30\%$.



Rys. 34. Zależność współczynnika H_p od wskaźnika D/h₁ przy płaszczeniu pasma płaskiego stałym gniotem względnym w pojedynczych przepustach

Fig. 34. The dependence of H_p coefficient upon D/h₁ factor while flattening a flat band employing invariable relative draft during single passes

W badaniach wstępnych wieloprzepustowego płaszczenia pasma płaskiego gniotem odpowiadającym wartości gniotu jak w fazie I wykazano, że istnieje zależność liniowa pomiędzy współczynnikiem H_p a gniotem względnym (rys. 35). Współczynnik nachylenia prostej (rys. 35) zależny jest od wskaźnika kształtu pasma płaskiego ($\delta = b_1/h_1$), uzyskanego po płaszczeniu drutu

Tablica 13

w pierwszym przepuście. W badanym zakresie gniotów im mniejszy wskaźnik (δ) kształtu pasma płaskiego, tym mniejsza wartość współczynnika H_p.



- Rys. 35. Zależność współczynnika H_p od stałej wartości gniotu w pojedynczych przepustach przy wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego, otrzymanego po I fazie płaszczenia drutów o różnych średnicach między walcami D = 100 mm
- Fig. 35. The dependence of H_p coefficient upon the constant value during single passes at multi pass flattening of a flat band obtained after the first phase of flattening wires of various diameters in rolls of D = 100 mm diameter

Ponieważ w procesie wieloprzepustowego płaszczenia pasma płaskiego istnieje liniowa zależność współczynnika H_p od parametru ln(D/h₁), a także występuje związek liniowy pomiędzy współczynnikiem H_p a stałym gniotem względnym (ε_h) w pojedynczych przepustach, to zależność współczynnika H_p od parametrów ln(D/h₁) i ε_h wyrażono funkcją:

$$H_{p} = C_{1} + C_{2} \ln \frac{D}{h_{1}} + C_{3} \varepsilon_{h}$$
(47)

Wykorzystując wyniki zamieszczone w tablicy 12, obliczono współczynniki równania (47) metodą najmniejszych kwadratów, które przedstawiono w tablicy 13.

Wyniki analizy regresji równania (47) i ich statystyki testu

| Współczynniki równania (47) | | Inia (47) Prawdopodobieństwo [n = 32] | | Współ. korelacji | Test | F | | |
|-----------------------------|----------------|---|---------------------|-----------------------|-------|----------------|-------|---------------------|
| C ₁ | C ₂ | C3 | P1 | P2 | p3 | R ² | F | р |
| -0,434 | 0,223 | 0,145 | 8x10 ⁻¹⁶ | 1,4x10 ⁻²⁴ | 0,012 | 0,975 | 572,4 | 5x10 ⁻²⁴ |

Po podstawieniu obliczonych współczynników C_1 , C_2 i C_3 (tablica 13) do równania (47) otrzymano funkcje opisująca zmiane współczynnika H_p w zależności od $ln(D/h_1)$ i ε_h .

$$H_{p} = -0,434 + 0,223 \ln \frac{D}{h_{1}} + 0,145\varepsilon_{h}$$
(48)

Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ występujące zmienne w równaniu (48) wpływają na wynikową cechę, którą stanowi współczynnik H_p (tablica 13). Wyniki testu F (tablica 13) potwierdzają dobre dopasowanie funkcji (48) do wyników badań.

Wstawiając równanie (48) do równania (43) oraz po jego przekształceniu uzyskano związek pomiędzy całkowitym współczynnikiem poszerzenia a parametrami procesu i grubością pasma płaskiego odkształcanego stałym gniotem w wieloprzepustowym płaszczeniu na zimno drutów ze stali w gat.C4D:

$$\beta_{cp} = 1 + 0,223 \left(\ln \frac{\mathbf{D}}{h_1} + 0,65\varepsilon_h - 1,946 \right) \ln \frac{1_1}{\gamma_{cp}}$$
(49)

Po podstawieniu wyznaczonych zależności (45) i (48), odpowiednio na współczynnik H_j i H_p, do równania (26) otrzymano zależność opisującą zmiany poszerzenia:

$$B = \begin{cases} 1 + \left(0,07 + 0,142\ln\frac{D}{d_{o}}\right)\ln\frac{1}{\gamma} & dla & 1 \le \frac{1}{\gamma} \le 2\\ 1 + \left(0,07 + 0,142\ln\frac{D}{d_{o}}\right)\ln\frac{1}{\gamma_{1}} + 0,22 \le \left(\ln\frac{D}{h_{1}} + 0,65\varepsilon_{h} - 1,946\right)\ln\frac{\gamma_{1}}{\gamma} & dla & \frac{1}{\gamma_{1}} < \frac{1}{\gamma} \le \frac{1}{\gamma_{c}} \end{cases}$$
(50)

w wieloprzepustowym płaszczeniu drutu okrągłego ze stali w gat.C4D na zimno, bez smarowania i stosowania naciągów. Obliczone współczynniki poszerzenia i gniotu z wyników pomiarów, jakie uzyskano w badaniach jedno- i wieloprzepustowego płaszczenia drutów ze stali w gatunku: C20D, C56D i C88D, zostały wykorzystane do wyznaczenia współczynników H_j i H_p zależności funkcyjnej (26) opisującej poszerzenie pasma. W procesie jednoprzepustowym zmiany współczynnika poszerzenia (β) od odwrotności współczynnika gniotu ($1 \le 1/\gamma \le 2$) opisano równaniem (42) tak jak w przypadku płaszczenia drutów ze stali w gat. C4D. Dla każdego badanego gatunku stali (C20D, C56D i C88D), początkowej średnicy drutu i średnicy walców D = 60 i 100 mm wyznaczono współczynnik H_j równania (42) metodą najmniejszych kwadratów. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 14.

Tablica 14

Wyniki aproksymacji funkcją (42) zmian β od 1/γ w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów ze stali w gat.: C20D, C56D i C88D

| Znak | D | d。 | Hj | R ² |
|-------|-----|------|-------|------------------------|
| stali | mm | mm | - | Accession of the local |
| | | 1,97 | 0,509 | 0,987 |
| | 60 | 3,27 | 0,401 | 0,989 |
| | | 3,73 | 0,360 | 0,986 |
| C20D | | 1,97 | 0,656 | 0,991 |
| | 100 | 3,27 | 0,551 | 0,988 |
| 1.000 | | 3,73 | 0,498 | 0,990 |
| | | 2,22 | 0,504 | 0,986 |
| | 60 | 2,94 | 0,416 | 0,998 |
| C56D | | 3,74 | 0,379 | 0,997 |
| | | 2,22 | 0,636 | 0,996 |
| | 100 | 2,94 | 0,563 | 0,983 |
| _ | 1 | 3,74 | 0,531 | 0,988 |
| | | 1,97 | 0,583 | 0,977 |
| | 60 | 3,24 | 0,428 | 0,986 |
| C88D | | 4,13 | 0,396 | 0,981 |
| | | 1,97 | 0,706 | 0,994 |
| - | 100 | 3,24 | 0,568 | 0,987 |
| | | 4,13 | 0,520 | 0,989 |

Wysokie wartości współczynnika korelacji (R²) wskazują na poprawność zależności (42) opisującej badane zmienne.

Podczas płaszczenia drutów z danego gatunku stali między walcami danej średnicy wartość współczynnika H_j maleje ze wzrostem średnicy drutu. Odwrotnie, przy $d_o = \text{const}$ wartość współczynnika H_j rośnie ze zwiększeniem średnicy walców. Dla odpowiadających warunków płaszczenia wartości współczynnika H_j są większe w przypadku płaszczenia drutów ze stali o wyższej zawartości węgla.

W pracach [18, 19, 24] oraz w niniejszym opracowaniu (pkt 4.5.) wykazano, że w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów współczynnik H_j zależny jest od wskaźnika D/d_o. Zależność ta również występuje w rozważanym przypadku - jednoprzepustowego płaszczenia drutów ze stali w gat.: C20D, C56D i C88D. Dla każdego badanego gatunku stali zmiany współczynnika H_j w zależności od wskaźnika D/d_o aproksymowano funkcją (44). Współczynniki B₁ i B₂ równania (44) obliczono metodą najmniejszych kwadratów, korzystając z danych zawartych w tablicy 14. Wyznaczone wartości współczynnika H_j w zależności od D/d_o wynoszą:

• dla płaszczenia drutów ze stali w gat. C20 D

 $H_{i} = -4$

$$0,346 + 0,256 \ln \frac{D}{d_o}$$
 $R^2 = 0,984$ (51)

dla płaszczenia drutów ze stali w gat. C56D

$$H_{j} = -0,326 + 0,257 \ln \frac{D}{d_{o}}$$
 $R^{2} = 0,979$ (52)

• dla płaszczenia drutów ze stali w gat. C88 D

$$H_{i} = -0.3 + 0.256 \ln \frac{D}{d_{o}}$$
 $R^{2} = 0.989$ (53)

Zmiany współczynnika H_j w zależności od wskaźnika D/d_o przedstawiono na rys. 36. Szczegółowa analiza zależności (51 ÷ 53) wykazuje, że w badanym zakresie zmienności wskaźnika 14 ≤ D/d_o ≤ 52 współczynnik H_j jest zależny od gatunku stali. O jego wartości przy danym wskaźniku D/d_o decyduje wartość stałej w równaniach (51 ÷ 53), która jest najmniejsza dla stali w gatunku C88D, a największa dla C20D. Wartości współczynnika H_j rosną ze wzrostem zawartości węgla w materiale drutów, a tym samym ze wzrostem wytrzymałości na rozciąganie drutów (rys. 36 i tabl.9).



- Rys. 36. Wpływ wskaźnika D/d, na współczynnik $\rm H_{j}$ w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów ze stali w gatunku: C20D, C56D i C88D
- Fig. 36. The influence of D/d_o factor on H_j coefficient during single pass flattening of wires made of C20D, C56D and C88D steel grades

Po podstawieniu każdej z osobna zależności: (51), (52) i (53) do równania (42) oraz po ich przekształceniu otrzymano wzory opisujące poszerzenie w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów ze stali:

• w gat. C20D
$$\beta = 1 + 0.256 \left(\ln \frac{D}{d_e} - 1.352 \right) \ln \frac{1}{\gamma}$$
 (54)

(55)

• w gat. C56D
$$\beta = 1 + 0.257 \left(\ln \frac{D}{d_o} - 1.268 \right) \ln \frac{1}{\gamma}$$

• w gat. C88D
$$\beta = 1 + 0.256 \left(\ln \frac{D}{d_o} - 1.172 \right) \ln \frac{1}{\gamma}$$
 (56)

Przykłady zmian współczynnika poszerzenia od odwrotności współczynnika gniotu $(1/\gamma)$, opisane powyższymi równaniami, dla jednoprzepustowego płaszczenia drutów danej średnicy ze stali w gat.: C20D, C56D i C88D przedstawiono na rys. 37 i 38. Jak wynika z rys. 37 i 38 druty o wyższej zawartości węgla, płaszczone w tych samych warunkach, doznają większego poszerzenia.



Rys. 37. Zależność współczynnika poszerzenia od odwrotności współczynnika gniotu w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów między walcami D = 60 mm





Rys. 38. Zależność współczynnika poszerzenia od odwrotności współczynnika gniotu w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów między walcami D = 60 mm

Fig. 38. The dependence of widening coefficient upon the inverse of draft coefficient during single pass flattening of wires in rolls of D = 60mm diameter

W wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego ze stali w gat.: C20D, C56D i C88D między walcami średnicy D = 60 i 100 mm pojedynczym gniotem względnym 0,15 lub 0,30 w przepustach związek pomiędzy β_{cp} a ln(1/ γ_{cp}) opisano funkcją (43). Dla badanych wariantów płaszczenia współczynnik H_p obliczono metodą najmniejszych kwadratów. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 15.
Tablica 15

Wyniki analizy regresji zależności (43) dla wieloprzepustowego płaszczenia

| Znak | h ₁ | b ₁ | ε _b | D | Hp | R ² |
|-------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|--------|----------------|
| stali | mm | mm | % | mm | | |
| | 1,71 | 2,10 | | | 0,427 | 0,994 |
| | 2,81 | 3,42 | 15 | | 0,311 | 0,989 |
| | 3,23 | 3,86 | | 60 | 0,259 | 0,986 |
| | 1,37 | 2,35 | U | | 0,434 | 0,991 |
| | 2,30 | 3,74 | 30 | | 0,322 | 0,995 |
| C20D | 2,65 | 4,16 | | | 0,283 | 0,974 |
| | 1,71 | 2,11 | | 1.1 | 0,522 | 0,999 |
| | 2,82 | 3,42 | 15 | | 0,405 | 0,991 |
| | 3,24 | 3,91 | | 100 | 0,373 | 0,970 |
| | 1,45 | 2,29 | | | 0,552 | 0,999 |
| | 2,30 | 2,79 | 30 | | 0,428 | 0,995 |
| | 2,66 | 4,34 | | | 0,375 | 0,992 |
| | 1,96 | 2,33 | | | 0,426 | 0,979 |
| | 2,52 | 3,22 | 15 | | _0,379 | 0,983 |
| - | 3,24 | 3,95 | | 60 | 0,321 | 0,986 |
| | 1,60 | 2,61 | | 1 | 0,430 | 0,990 |
| C56D | 2,10 | 3,52 | 30 | | 0,364 | 0,988 |
| | _ 2,66 | 4,20 | | | 0,299 | 0,994 |
| | 1,88 | 2,36 | 15 | | 0,545 | 0,991 |
| | 2,56 | 3,24 | | | 0,476 | 0,986 |
| | 3,26 | 3,98 | | 100 | 0,393 | 0,991 |
| | 1,58 | 2,64 | | | 0,550 | 0,997 |
| | 2,10 | 3,58 | 30 | | 0,469 | 0,993 |
| 10 m | 2,68 | 4,46 | | - | 0,401 | 0,993 |
| | 1,70 | 2,16 | | | 0,480 | 0,996 |
| | 2,80 | 3,48 | 15 | | 0,367 | 0,993 |
| | 3,57 | 4,36 | | 60 | 0,315 | 0,995 |
| [| 1,40 | 2,37 | | | 0,508 | 0,996 |
| [| 2,33 | 3,78 | 30 | | 0,382 | 0,993 |
| C88D | 2,93 | 4,76 | | | 0,323 | 0,995 |
| | 1,78 | 2,11 | | | 0,593 | 0,996 |
| [| 2,82 | 3,53 | 15 | | 0,452 | 0,992 |
| [| 3,60 | 4,46 | | 100 | 0,415 | 0,977 |
| | 1,45 | 2,38 | | 1000 | 0,596 | 0,997 |
| [| 2,32 | 3,93 | 30 | | 0,477 | 0,980 |
| 0.0 | 2.95 | 4.81 | 10 Million 11 | and the second second | 0.404 | 0.097 |

pasma płaskiego ze stali w gat.: C20D, C56D i C88D

W płaszczeniu pasma płaskiego ze stali w gatunku: C20D, C56D i C88D występuje podobny charakter wpływu gniotu w przepuście (ε_h) i wskaźnika D/h₁ na współczynnik H_p jak w przypadku stali C4D (pkt 4.5.). Współczynnik H_p jest zależny od gatunku stali płaszczonych drutów. Przy porównywalnych parametrach: $\delta = \text{const}$, $\varepsilon_h = \text{const}$ i D = const, ze wzrostem wytrzymałości na rozciąganie drutu (tabl. 9) wartość współczynnika H_p się zwiększa. Przedstawione w tablicy 15 opracowane wyniki badań z wieloprzepustowego płaszczenia pasma płaskiego w gat.: C20D, C56D i C88D wykorzystano do obliczenia stałych: C₁, C₂ i C₃ występujących w równaniu (47). Ich wartości obliczono metodą najmniejszych kwadratów. Uzyskane równania opisujące współczynnik H_p w zależności od $ln(D/h_1)$ i ϵ_h są następujące:

• dla płaszczenia pasma płaskiego ze stali w gat. C20D

$$H_p = -0.376 + 0.23 \ln \frac{D}{h_1} - 0.195 \varepsilon_h$$
 $R^2 = 0.983$ (57)

• dla płaszczenia pasma płaskiego ze stali w gat. C56D

F

$$H_{p} = -0.317 + 0.229 \ln \frac{D}{h_{1}} - 0.309 \varepsilon_{h}$$
 $R^{2} = 0.976$ (58)

• dla płaszczenia pasma płaskiego ze stali w gat. C88D

$$H_{p} = -0,287 + 0,223 \ln \frac{D}{h_{1}} - 0,223\epsilon_{h}$$
 $R^{2} = 0,974$ (59)

W układzie współrzędnych [H_p , D/h₁, ε_h] dla zakresu zmiennych D/h₁ \in [15, 70] i $\varepsilon_h \in$ [0,15; 0,30] wynikającego z przyjętego programu badań zależności (57 ÷ 59) charakteryzują powierzchnię. Przykładowy obraz graficzny zależności (57) przedstawiono na rys. 39.



- Rys. 39. Zależność współczynnika Hp od wskaźnika D/h₁ i ε_b podczas płaszczenia stałym gniotem pasma płaskiego ze stali w gat. C20D
- Fig. 39. The dependence of H_p coefficient upon D/h_l and ϵ_h factors during flattening a flat band made of C20D steel grade while employing a constant draft

Z analizy równań (57 \div 59) wynika, że współczynnik H_p zależny jest od D/h₁ i ϵ_h , a charakter ich wpływu jest identyczny.

Po podstawieniu każdej z osobna wyznaczonej zależności (57 + 59) do równania (43) i po ich przekształceniu uzyskano wzory do obliczenia całkowitego współczynnika poszerzenia podczas wieloprzepustowego płaszczenia pasma płaskiego, otrzymanego z drutu po płaszczeniu w I fazie dla następujących gatunków stali:

• C20D
$$\beta_{cp} = 1 + 0.23 (\ln \frac{D}{h_1} - 0.8485 \varepsilon_h - 1.635) \ln \frac{1}{\gamma_{cn}}$$
 (60)

(61)

• C56D
$$\beta_{cp} = 1 + 0.229 (\ln \frac{D}{h_1} - 1.349 \varepsilon_h - 1.384) \ln \frac{1}{\gamma_{cp}}$$

• C88D
$$\beta_{cp} = 1 + 0.223 (\ln \frac{D}{h_1} - \epsilon_h - 1.287) \ln \frac{1}{\gamma_{cp}}$$
 (62)

Przykłady zmian współczynnika poszerzenia w zależności od $(1/\gamma_{cp})$ podczas płaszczenia pasma płaskiego stałym gniotem dla badanych stali przedstawiono na rys. 40 +42.



Rys. 40. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu podczas płaszczenia pasma płaskiego $\varepsilon_h = 30\%$ między walcami średnicy D = 60 mm. Gat. stali C56D Fig. 40. The dependence of total widening coefficient upon the inverse of the total draft coefficient during flattening of $\varepsilon_h = 30\%$ flat band in rolls of D = 60mm diameter. C20D steel grade



Rys. 41. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu podczas płaszczenia pasma płaskiego $\varepsilon_h = 15\%$ między walcami o różnych średnicach. Gat. stali C20D Fig. 41. The dependence of total widening coefficient upon the inverse of total draft coefficient during flattening of $\varepsilon_h = 15\%$ flat band in rolls of different diameters. C20D steel grade



Rys. 42. Zależność całkowitego współczynnika poszerzenia od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu podczas płaszczenia pasma płaskiego $\varepsilon_h = 15\%$ między walcami o średnicy D = 100 mm dla różnych stali

Fig. 42. The dependence of total widening coefficient upon the inverse of total draft coefficient during flattening of $\varepsilon_{\rm h} = 15\%$ flat band in rolls of D = 100 mm diameter for different types of steel

Wprowadzając oddzielnie zależności: (51 i 57), (52 i 58) i (53 i 59) do zależności funkcyjnej (26), otrzymuje się wzory opisujące poszerzenie w wieloprzepustowym płaszczeniu drutów po patentowaniu ze stali:

$$\beta = \begin{cases} 1 + 0.256(\ln\frac{D}{d_{o}} - 1.352)\ln\frac{1}{\gamma} & \text{dla} \quad 1 \le \frac{1}{\gamma} \le 2\\ 1 + 0.256(\ln\frac{D}{d_{o}} - 1.352)\ln\frac{1}{\gamma_{1}} + 0.23(\ln\frac{D}{h_{1}} - 0.848\varepsilon_{h} - 1.635)\ln\frac{\gamma_{1}}{\gamma} & \text{dla} \quad \frac{1}{\gamma_{1}} < \frac{1}{\gamma} \le \frac{1}{\gamma_{c}} \end{cases}$$
(63)

w gat. C56D

$$\beta = \begin{cases} 1 + 0.257(\ln\frac{\mathbf{D}}{d_{o}} - 1.268)\ln\frac{1}{\gamma} & \text{dla} & 1 \le \frac{1}{\gamma} \le 2\\ 1 + 0.257(\ln\frac{\mathbf{D}}{d_{o}} - 1.268)\ln\frac{1}{\gamma_{1}} + 0.229(\ln\frac{\mathbf{D}}{h_{1}} - 1.349\varepsilon_{h} - 1.384)\ln\frac{\gamma_{1}}{\gamma} & \text{dla} & \frac{1}{\gamma_{1}} < \frac{1}{\gamma} \le \frac{1}{\gamma_{c}} \end{cases}$$
(64)

w gat. C88D

$$\beta = \begin{cases} 1 + 0.256(\ln\frac{D}{d_{o}} - 1.172)\ln\frac{1}{\gamma} & dla & 1 \le \frac{1}{\gamma} \le 2\\ 1 + 0.256(\ln\frac{D}{d_{o}} - 1.172)\ln\frac{1}{\gamma_{1}} + 0.223(\ln\frac{D}{h_{1}} - \varepsilon_{h} - 1.287)\ln\frac{\gamma_{1}}{\gamma} & dla & \frac{1}{\gamma_{1}} < \frac{1}{\gamma} \le \frac{1}{\gamma_{o}} \end{cases}$$
(65)

Przebiegi zmian współczynnika poszerzenia opisanego zależnościami (63) i (65) na tle wyników pomiarów podczas wieloprzepustowego płaszczenia drutów w gatunku C20D i C88D przedstawiono odpowiednio na rys. 43 i 44.



- Rys. 43. Porównanie wyników współczynnika poszerzenia obliczonego wg wzoru (63) oraz zmierzonego podczas wieloprzepustowego płaszczenia drutu o średnicy d = 1,92 mm gniotem 15% lub 30% między walcami o średnicy D = 60 mm. Gat. stali C20D
- Fig. 43. The comparison of results of widening coefficient calculated according to (63) formula and measured during multi pass flattening of wire of d = 1.92mm diameter by a 15% or 30% draft in rolls of D = 60 mm. C20D steel grade



Rys. 44. Porównanie wyników współczynnika poszerzenia obliczonego wg wzoru (65) oraz zmierzonego podczas wieloprzepustowego płaszczenia drutu o średnicy d = 3,24 mm gniotem 15% lub 30% między walcami o średnicy D = 100 mm. Gat. stali C88D

Fig. 44. The comparison of results of widening coefficient calculated according to (63) formula and measured during multi pass flattening of wire of d = 3.27mm by a 15% or 30% draft in rolls of D = 100 mm C88D steel grade

4.7. Wpływ własności materiału na poszerzenie w procesie płaszczenia drutów ze stali węglowych

Opis wpływu własności materiału na poszerzenie w płaszczeniu drutów ze stali węglowych (gat. C4D, C20D, C56D i C88D) o różnej strukturze, a tym samym o różnych własnościach, rozpoczęto od porównania między sobą współczynników H_j i H_p, decydujących o poszerzeniu odkształcanych drutów w I i II fazie. Porównania tego dokonano dla jednakowych warunków odkształcania. Warunki te dla jednoprzepustowego płaszczenia pasma o przekroju kołowym są spełnione dla zakresu zmiennych: $d_o \in [1,92;$ 4,2], D = 60 i 100 mm oraz $\gamma \in [1; 0,5]$, a dla wieloprzepustowego płaszczenia pasma płaskiego stałą wartością gniotu dla zmiennych: $h_1 \in [1,40; 3,4]$, D = 60 i 100 mm, $\varepsilon_h = 15$ i 30 % $\gamma_{cp} \in [1; 0,4]$.

Dla przyjętego zakresu zmiennych, w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów po wyżarzaniu (gat. C4D), współczynnik H_j w zależności od D/d_o wyznaczono ponownie, zgodnie z metodą jak w pkt.4.5. Wartości stałych B₁ i B₂ równania (44) oraz średnią wytrzymałość na rozciąganie materiału drutów i jego struktury zestawiono w tablicy 16.

od R_m drutów i ich struktury

Tablica 16

Wartości stałych B1 i B2 równania (44) w zależności

| Znak stali | Typ struktury | R _m MPa | Wskaźnik D/d _o | Współcz równan | ynniki ia (44) | Współcz. korelacji | |
|---------------|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|--|
| drutów | | | | B ₁ | B ₂ | R ² | |
| C4D | F | 370 | 12-105 | 0,070 | 0,142 | 0,942 | |
| C4D | F | 370 | 14-52 | -0,008 | 0,170 | 0,966 | |
| C20D | F+P | 645 | 14-52 | -0,346 | 0,256 | 0,984 | |
| C56D | P+F | 1015 | 14-52 | -0,326 | 0,257 | 0,979 | |
| C88D | Р | 1340 | 14-52 | -0,300 | 0,256 | 0,989 | |

W tablicy (16) typ struktury oznaczono: F – ferrytyczna, F + P – ferrytyczno -perlityczna, P + F – perlityczno – ferrytyczna, P – perlityczna. Podana w tablicy 16 wytrzymałość na rozciąganie materiału drutów jest wartością średnią obliczoną dla zakresu średnic drutu od 1,98 do 4,92 mm w zależności od gatunku stali (tabl. 9).

W jednoprzepustowym płaszczeniu drutów po wyżarzaniu (stal w gat.C4D) i po patentowaniu (stale w gat.: C20D, C56D i C88D) zmiany współczynnika H_j w zależności od ln(D/d_o) przedstawiono na rys. 45.



Rys. 45. Zależność współczynnika H_j od ln(D/d_o) w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów ze stali węglowych
 Fig. 45. The dependence of H_p coefficient upon D/d_o factor during multi pass flattening of wires made of carbon steel

Z danych zawartych w tabl. 16 wynika, że wartości stałych B_1 i B_2 dla wskaźnika D/d_o w zakresie od 14 ÷ 52 zależne są od gatunku stali i struktury, a tym samym wytrzymałości na rozciąganie. Ze wzrostem wytrzymałości na rozciąganie materiału drutów występuje proporcjonalny przyrost współczynnika H_j (rys. 45). W przypadku płaszczenia drutów ze stali w gat. C4D, o najmniejszej wytrzymałości na rozciąganie, wartość współczynnika B_2 wynosi 0,170. Jest ona znacznie mniejsza od wartości współczynnika B_2 dla stali w gat. C20D ÷ C88D, która wynosi 0,256

Wpływ własności materiału na współczynnik H_j wyrażono za pomocą stosunku bezwymiarowego (R_*^*/R_m), który charakteryzuje zapas plastyczności materiału [37, 43, 54, 55]. Gdy stosunek R_*^*/R_m zbliża się do jedności, to występuje wyraźny spadek zapasu plastyczności (krzywa $R_{0,2}$ zbliża się do krzywej R_m). Znaczne obniżenie wydłużenia oraz zapasu plastyczności w warstwach materiału leżących blisko powierzchni może być bezpośrednią przyczyną pojawienia się na powierzchni zarodków pęknięć, które następnie mogą rozwijać się w makropęknięcia pod wpływem naprężeń rozciągających. Znak (*) oznacza umowną granicę plastyczności. Dla stałego wskaźnika D/d_o zależność współczynnika H_j od stosunku (R_{\bullet}^{*}/R_{m}) przedstawiono na rys. 46. Zależność ta może być opisana funkcją liniową typu y = ax + b. Dla danego D/d_o ze wzrostem stosunku R_{e}^{*}/R_{m} maleje współczynnik H_j.



- Rys. 46. Zależność współczynnika H_j od R_e/R_m dla stałego wskaźnika D/d_o w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów ze stali węglowych
- Fig. 46. The dependence of H_j coefficient upon R_e[•]/R_m for constant D/d_o factor during single pass flattening of wires made of carbon steel

Po uzmiennieniu współczynnika H_j opisanego wzorem (48) dodatkowo od stosunku R_{*}^{*}/R_m otrzymano zależność w postaci:

$$H_{j} = C_{1} + C_{2} \ln \frac{D}{d_{o}} + C_{3} \frac{R_{e}^{*}}{R_{m}}$$
(66)

Stałe C₁, C₂ i C₃ równania (66) obliczono metodą najmniejszych kwadratów na podstawie danych zamieszczonych w tablicach: 9, 10 i 14. Uzyskane wyniki analizy regresji wielokrotnej przedstawiono w tablicy 17. Wyniki testu istotności dla współczynników regresji (tabl. 17) wykazują, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ na badaną cechę wynikową bardzo silnie wpływa wskaźnik D/d_o, natomiast wpływ zmiennej R^{*}_{*}/R_m jest mniejszy.

Tablica 17

Wyniki analizy regresji wielokrotnej równania (66)

| Współczyn | Współczynniki równania (66) | | | Prawcopodobieństwo [n = 24] | | | Test F | |
|----------------|-----------------------------|--------|------------|----------------------------------|----------------|----------------|--------|-----------------------|
| C ₁ | C ₂ | C3 | P 1 | p ₂ | p ₃ | R ² | F | p |
| -0,141 | 0,241 | -0,182 | 0,08 | 9,9x10 ⁻¹³ | 0,07 | 0,916 | 114,1 | 5,2x10 ⁻¹² |

Po podstawieniu wyznaczonych wartości stałych C_1 , C_2 i C_3 do wzoru (66) uzyskano zależność opisującą zmiany współczynnika H_j w zależności od $\ln(D/d_o)$ i R^*_*/R_m w postaci:

$$H_{j} = 0,241 \ln \frac{D}{d_{o}} - 0,182 \frac{R_{o}^{*}}{R_{m}} - 0,141$$
(67)

Po podstawieniu zależności (67) do wzoru (42) i przekształceniu otrzymano postać zależności, która opisuje zmianę poszerzenia pasma podczas jednoprzepustowego płaszczenia drutów:

$$\beta = 1 + 0.241 (\ln \frac{D}{d_o} - 0.755 \frac{R_e^*}{R_m} - 0.585) \ln \frac{1}{\gamma}$$
(68)

Ze wzoru (68) wynika, że poszerzenie w jednoprzepustowym płaszczeniu na zimno drutów okrągłych ze stali węglowych jest zależne od parametrów płaszczenia i zapasu plastyczności materiału.

W płaszczeniu pasma płaskiego stałą wartością gniotu dla badanych gatunków stali współczynnik H_p opisano zależnością (47), która w układzie współrzędnych $[\ln(D/h_1); H_p]$ dla $\varepsilon_h = 15\%$ lub 30% jest liniowa. Wartości stałych: C₁, C₂ i C₃ równania (47) oraz średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie materiału drutów i jego typ struktury zestawiono w tablicy 18 Przebiegi zmian współczynnika H_p od ln (D/h₁) dla ε_h = const przedstawiono na rys. 47 i 48.

Tablica 18

Wartości stałych C1,C2 i C3 w zależności od Rm materiału drutów i jego struktury

| ſ | Znak | Тур | R _m | WskaYhik | Gniot | Wspó ³ cz | . równania (4 | 17) | Wspó³cz. |
|---|--------|-----------|----------------|------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | stali | struktury | MPa | D/h ₁ | ε _h | C ₁ | C ₂ | C ₃ | korelacji |
| | drutów | | | | % | | | | R ² |
| | C4D | F | 370 | 16-150 | 15-30 | -0,434 | 0,223 | 0,145 | 0,975 |
| | C4D | F | 370 | 17-75 | 15-30 | -0,616 | 0,290 | -0,097 | 0,966 |
| | C20D | F+P | 645 | 17-75 | 15-30 | -0,376 | 0,23 | -0,195 | 0,983 |
| | C56D | P+F | 1015 | 17-75 | 15-30 | -0,317 | 0,229 | -0,309 | 0,976 |
| ſ | C88D | Р | 1340 | 17-75 | 15-30 | -0,287 | 0,223 | -0,223 | 0,974 |

Podczas wieloprzepustowego płaszczenia stałym gniotem pasma płaskiego ze stali w gat. C20D \div C88D w zakresie wskaźnika 17 \leq D/h₁ \leq 75 stwierdzono nieznaczną zmianę wartości współczynnika C₂ nachylenia prostych aproksymacji (tabl.18), odpowiednio z wartości 0,23 do wartości 0,223. W płaszczeniu pasma płaskiego ze stali w gat. C4D wartość współczynnika C₂ nachylenia prostej aproksymacji wynosi 0,290 (tabl.18) i jest ona wyższa od wartości współczynnika nachylenia prostej aproksymacji dla grupy stali w gat. C20D \div C88D (rys. 47 i 48).



Rys. 47. Zależność współczynnika H_p od ln (D/h₁) w wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego ze stali węglowych dla gniotu 15%

Fig. 47. The dependence of H_p coefficient upon $ln(D/h_l)$ during multi pass flattening of a flat band made of carbon steel at 15% draft



Rys. 48. Zależność współczynnika H_p od ln (D/h_l) w wieloprzepustowym płaszczeniu pasma płaskiego ze stali weglowych dla gniotu 30%

Fig. 48. The dependence of H_p coefficient upon $ln(D/h_1)$ during multi pass flattening of a flat band made of carbon steel at 30% draft

Współczynnik H_p w zależności od własności materiału drutów ze stali węglowych, wyrażony stosunkiem R_*^*/R_m , i parametrów procesu wyrażono funkcją w postaci:

$$H_{p} = D_{1} + D_{2} ln \frac{D}{h_{1}} + D_{3} \varepsilon_{h} + D_{4} \frac{R_{e}^{*}}{R_{m}}$$

(69)

]

Stałe D_1 , D_2 , D_3 i D_4 równania (69) obliczono metodą najmniejszych kwadratów na podstawie danych zawartych w tablicach: 9, 12 i 15. Uzyskane wyniki analizy regresji wielokrotnej przedstawiono w tablicy 19.

Tablica 19

Wyniki analizy regresji wielokrotnej równania (69)

| Współczynniki równania (69) | | | | Prawdopodobieństwo [n = 48] | | | | Współ. korelacji | Test F | |
|-----------------------------|----------------|--------|----------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------|-----------------------|
| Di | D ₂ | D3 | D ₄ | P1 | P2 | P3 | P4 | R ² | F | p |
| -0,268 | 0,248 | -0,213 | -0,207 | 9,3x10 ⁻⁵ | 2,2x10 ⁻²³ | 1,6x10 ⁻³ | 8,8x10 ⁻³ | 0,899 | 130,2 | 6,7x10 ⁻²² |

Po podstawieniu obliczonych współczynników regresji (tabl.19) do równania (69) otrzymano zależność na współczynnik H_p:

$$H_{p} = 0,2481n \frac{D}{h_{1}} - 0,213\epsilon_{h} - 0,207 \frac{R_{e}^{*}}{R_{m}} - 0,268$$
(70)

który występuje w równaniu (43) opisującym poszerzenie pasma podczas wieloprzepustowego płaszczenia pasma płaskiego. Wyniki testu istotności dla współczynników regresji zestawiono w tabl.19. Potwierdzają one, że na przyjętym poziomie istotności $\alpha =$ 0,05 badane zmienne znacznie oddziałują na współczynnik H_p.

Po wstawieniu wzorów (67) i (70) do równania (26) uzyskano postać zależności, która opisuje zmianę współczynnika poszerzenia pasma w funkcji parametrów procesu i własności wytrzymałościowych materiału drutów podczas ich wieloprzepustowego płaszczenia metodą walcowania:

$$\beta = \begin{cases} 1 + 0.241 (\ln \frac{\mathbf{D}}{d_{o}} - 0.755 \frac{\mathbf{R}_{o}^{*}}{\mathbf{R}_{m}} - 0.585) \ln \frac{1}{\gamma} & \text{dla} \quad 1 \le \frac{1}{\gamma} \le 2\\ \beta + 0.248 (\ln \frac{\mathbf{D}}{h_{1}} - 0.859\varepsilon_{h} - 0.835 \frac{\mathbf{R}_{o}^{*}}{\mathbf{R}_{m}} - 1.081) \ln \frac{\gamma_{1}}{\gamma} & \text{dla} \quad \frac{1}{\gamma_{1}} < \frac{1}{\gamma} \le \frac{1}{\gamma_{c}} \end{cases}$$
(71)

4.8. Promień zarysu powierzchni swobodnej pasma w procesie płaszczenia drutów

Podczas płaszczenia drutu okrągłego w kotlinie walcowniczej w płaszczyźnie wejścia stosunek $b_{s1}/b_1 = 0$, bo $l_d = 0$ i $b_{s1} = 0$ (rys. 49). W miarę zgniatania wartość stosunku b_{s1}/b_1 rośnie, dążąc teoretycznie do jedności. Jest to przypadek, w którym promień powierzchni swobodnej dąży do nieskończoności - bok staje się prosty. W rzeczywistych warunkach jest to niemożliwe ze względu na występowanie sił tarcia na powierzchni styku narzędzia z metalem i niejednorodnością odkształcenia na przekroju poprzecznym pasma.





Rys. 49. Schemat pomiaru rozkładu grubości i szerokości pasma oraz szerokości styku metalu z walcem wzdłuż kotliny walcowniczej płaszczonego drutu okrągłego

Fig. 49. The diagram of measurement of thickness and width distribution of a band and the width of contact of metal of a band with a roll along the rollgap of a flattened round wire

Krzywa graniczna pomiędzy powierzchnią styku metalu z walcem a zarysem powierzchni swobodnej pasma jest krzywą przestrzenną. Rzut krzywej granicznej na płaszczyznę walcowania daje krzywą paraboliczną (rys. 49). Związek pomiędzy stosunkiem b_{s1}/b_1 a parametrami płaszczenia można przedstawić w postaci funkcji:

$$\frac{\mathbf{b}_{s1}}{\mathbf{b}_{1}} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\gamma}_{1}, \mathbf{d}_{o}, \mathbf{D}) \tag{72}$$

Matematyczną postać tej funkcji wyznaczono eksperymentalnie. W tym celu na niedowalcowanym paśmie płaszczonego drutu ze stali w gat. C4D (rys. 49) wykonano pomiary w trzech prostopadłych kierunkach względem siebie, rozkładu grubości (h_x) i szerokości (b_{sx} i b_x) na długości kotliny walcowniczej (l_{dx}). Pomiary te wykonano na mikroskopie świetlnym sprzężonym z rejestratorem cyfrowym z dokładnością do 0,001 mm w odstępach co 0,5 mm. Wyniki pomiarów b_{sx}/b_x = f [ln (1/ γ_{1x})] przedstawiono na rys. 50, z którego wynika, że rozkład ten jest paraboliczny.



Rys. 50. Rozkład stosunku b_{sx}/b_x wzdłuż łuku styku metalu z walcem w jednoprzepustowym płaszczeniu drutu o średnicy $d_0 = 5,69$ mm między walcami o średnicy D = 210 mm. Stał w gat. C4D

Fig. 50. The distribution of b_{sx}/b_x ratio along the contact arc of metal with a roll during single pass flattening of wire of $d_o = 5.69$ nm diameter with rolls of D = 210 nm diameter. C4D steel grade

Zależność (72) można zatem przedstawić w postaci:

$$\frac{b_{sx}}{b_{x}} = [\ln(1/\gamma_{1x})]^{k_{H}}$$
(73)

gdzie: k_H - wykładnik zależny od D/do.

W celu wykazania istnienia lub braku wpływu średnic D i d_o na stosunek b_{s1}/b₁ wykonano pomiary szerokości styku pasma z walcem b_{si} i szerokości b₁ na pasmach, pochodzących z jednoprzepustowego płaszczenia gniotem $0.5 \le \varepsilon_{h1} < 1$ drutów okrągłych średnicy $1.98 \le d_0 \le 4.92$ mm między walcami średnicy $60 \le D \le 210$ mm. Wyniki pomiarów zmian

Tablica 20

 b_{s1}/b_1 od ln(1/ γ_1) dla płaszczonych drutów o średnicy $d_0 = 4,92$ mm między walcami o różnej średnicy przedstawiono na rys. 51. Wynika z niego, że wpływ średnicy walców na wartość stosunku b_{s1}/b_1 jest pomijalnie mały.



Rys. 51. Stosunek b_s1/b₁ w zależności od ln(1/γ₁) podczas jednoprzepustowego płaszczenia drutu o średnicy d_o = 4,92 mm między walcami o różnej średnicy. Stal w gat. C4D

Fig. 51. The b_{sl}/b_l ratio depending on $(ln1/\gamma_l)$ during single pass flattening of wire of $d_o = 4,92mm$ diameter with rolls of different diameter. C4D steel grade

Wyniki pomiarów b_{s1}/b_1 w zależności od ln(1/ γ_1) dla płaszczenia drutów o średnicy 1,98 $\leq d_0 \leq 4,92$ mm między walcami średnicy D = 100 mm przedstawiono na rys. 52. Wynika z niego, że wpływ średnicy drutu na wartość stosunku b_{s1}/b_1 jest pomijalnie mały.



Rys. 52. Stosunek b_{s1}/b_1 w zależności od $(\ln 1/\gamma_1)$ dla jednoprzepustowego płaszczenia drutów o różnej średnicy między walcami o średnicy D = 100 mm. Stal w gat. C4D

Fig. 52. The b_{sl}/b_l ratio depending on $(ln1/\gamma_l)$ for single pass flattening of wires of various diameter with rolls of D = 100 mm. C4D steel grade

Wartości wykładnika k_H zależności (73) dla stałych średnic walców i zmiennych średnic drutu wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów ujęto w tablicy 20.

Wartości wykładnika k_H wzoru (73) dla zakresu średnic: 1,98 $\leq d_o \leq 4,92$ mm i 60 $\leq D \leq 210$ mm

oraz $0.5 \le \gamma_1 < 1$, stali w gat. C4D

| D mm | k _H | S _k | R ² |
|-------------|----------------|----------------|----------------|
| 60 | 0,398 | 0,0068 | 0,989 |
| 100 | 0,405 | 0,0095 | 0,983 |
| 160 | 0,383 | 0,005 | 0,992 |
| 210 | 0,407 | 0,0088 | 0,983 |
| 60 do 210 | 0,397 | 0,0038 | 0,986 |

Analizując wyniki (tabl. 20), stwierdzono, że podczas płaszczenia gniotem $0,5 \le \varepsilon_{h1} < 1$ drutów o średnicy $1,98 \le d_o \le 4,92$ mm między walcami o różnej średnicy brak istotnego wpływu d_o i D na wykładnik k_H. Wykładnik k_H przyjmuje wartości bliskie 0,4 (z wyjątkiem wartości dla walców D = 160 mm). Wyznaczone odchylenia standardowe (S_k) dla wykładnika k_H są bardzo małe, a wartości współczynnika korelacji bliskie jedności potwierdzają dobre dopasowanie funkcji opisującej wyniki eksperymentalne.

Dla zakresu zmiennych średnic drutu 1,98 \div 4,92 mm i zmiennych średnic walców 60 \div 210 mm obliczona wartość wykładnika k_H, metodą najmniejszych kwadratów, wynosi 0,397 (tabl. 20). Wartość tę ze względów praktycznych zaokrąglono do wartości 0,4. Zatem, w jednoprzepustowym płaszczeniu drutu zależność stosunku szerokości b_{s1}/b₁ od odwrotności współczynnika gniotu jest w postaci:

$$\frac{\rho_{s1}}{\rho_1} = \left[\ln(\frac{1}{\gamma_1})\right]^{0,4}$$
(74)

której przebieg na tle wyników pomiarów przedstawia rys. 50.

Po podstawieniu równania (74) do wzoru (31) otrzymano zależność w postaci

r,

$$=\frac{d_{o}}{4}\left|\frac{\gamma_{1}^{2}}{\beta_{1}\left[1-\left(\ln\frac{1}{\gamma_{1}}\right)^{0,4}\right]}+\beta_{1}\left[1-\left(\ln\frac{1}{\gamma_{1}}\right)^{0,4}\right]\right|$$
(75)

opisującą zmianę promienia powierzchni swobodnej pasma w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów. Z analizy wzoru (75) wynika, że promień zależny jest od początkowej średnicy płaszczonego drutu, wartości współczynnika gniotu i poszerzenia w przepuście. Zmianę promienia ri w zależności od odwrotności współczynnika gniotu podczas płaszczenia drutu o średnicy $d_0 = 1.98$ mm w walcach o różnej średnicy przedstawiono na rys.53. Promień ze wzrostem gniotu (maleje wartość współczynnika gniotu) zmniejsza się, osiągając minimum przy $1/\gamma_1 \approx 1,9$, po czym wzrasta.



- Rys. 53. Promień powierzchni swobodnej pasma w zależności od 1/y, w jednoprzepustowym płaszczeniu drutu średnicy do = 2 mm między walcami o różnych średnicach. Stal w gat. C4D
- Fig. 53. The radius of free surface of the band depending on $1/\gamma_1$ during single pass flattening of wire of d_o = 2mm diameter with rolls of various diameters. C4D steel grade

Badanie funkcji opisującej promień (r₁) w zależności od współczynnika gniotu (γ_1) i wskaźnika D/do przeprowadzono przyjmując początkową średnicę drutu jako wielkość odniesienia. Promień przedstawiony bezwymiarowo (r1/do) od wskaźnika (D/do) oraz współczynnika gniotu γ_1 wynosi:

$$\frac{\mathbf{r}_{1}}{\mathbf{d}_{o}} = 0,25 \left[\frac{\gamma_{1}^{2}}{\Psi(\gamma_{1}, \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{d}_{o}})} + \Psi(\gamma_{1}, \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{d}_{o}}) \right]$$
(76)

gdzie: ψ - bezwymiarowa funkcja wyrażona wzorem:

 $\Psi(\gamma_1, \frac{D}{d_{\bullet}}) = \beta(\gamma_1, \frac{D}{d_{\bullet}}) \left[1 - \left(\ln \left(\frac{1}{\gamma_1} \right) \right)^{0.4} \right]$

w której

$$\beta(\gamma_1, \frac{D}{d_2})$$
 - współczynnik poszerzenia jest równy:

$$\beta\left(\gamma_{1}, \frac{D}{d_{o}}\right) = 1 + \left(0, 142 \ln\left(\frac{D}{d_{o}}\right) + 0, 07\right) \ln\left(\frac{1}{\gamma_{1}}\right)$$

Dla zakresu zmiennych:

$$\frac{\mathbf{D}}{\mathbf{d}_{\circ}} \in [12;106]$$
$$\frac{1}{\gamma_{1}} \in [1,0;2,0]$$

wynikającego z przyjętego programu badań:

Y

$$\gamma_1 \in [0,5;1,0]$$

 $d_0 \in [1,98;4,92]$
 $D \in [60;210]$

zależność (76) w układzie współrzędnych $(1/\gamma_1, D/d_o, r_1/d_o)$ jest powierzchnią którą graficznie przedstawiono na rys. 54.

(77)

(78)



 Rys. 54. Zależność względnego promienia zarysu powierzchni swobodnej pasma od odwrotności współczynnika gniotu i wskaźnika D/d_o w jednoprzepustowym płaszczeniu drutów ze stali w gat. C4D
 Fig. 54. The dependence of relative radius of free surface profile of a band upon the inverse of a draft coefficient

and D/d_o factor during single pass flattening of wires made of C4D steel grade

Dla danego wskaźnika izolinia powierzchni (76) wykazuje podwójne ekstremum w zależności od odwrotności współczynnika gniotu. Przykładowo wybraną izolinię dla stosunku $D/d_0=50$ przedstawiono na rys. 55.

Z uwagi na złożoną postać pochodnej:

$$\left(\frac{\mathbf{r}_{i}}{\mathbf{d}_{o}}\right)^{\prime} = \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}\left(\frac{1}{\gamma_{1}}\right)} \left(\frac{\mathbf{r}_{i}}{\mathbf{d}_{o}}\left(\frac{1}{\gamma_{1}}, \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{d}_{o}}\right)\right) \Big|_{\frac{\mathbf{D}}{\mathbf{d}_{o}} = \text{const}}$$
(79)

oraz trudności w analitycznym wyznaczeniu ekstremów na izoliniach $D/d_o = \text{const}$ powierzchni (76) zastosowano jedną ze znanych metod optymalizacji numerycznej [8, 33]. Ekstremum krzywej określono, wykorzystując gotowy algorytm dla metody gradientów sprzężonych [8] zawarty w opcji SOLVER arkusza kalkulacyjnego Excel.



- Rys. 55. Zależność względnego promienia powierzchni swobodnej pasma od odwrotności współczynnika gniotu w jednoprzepustowym płaszczeniu drutu ze stali w gat. C4D dla wskaźnika D/d_o = 50
- Fig. 55. The dependence of relative radius of free surface profile of a band upon the inverse of a draft coefficient during single pass flattening of a wire made of C4D steel grade for $D/d_0 = 50$ factor

Wyznaczone zależności dotyczące wpływu wskaźnika D/d_o na wartości współrzędnych: $\left(\frac{1}{\gamma_1}, \frac{r_1}{d_o}\right)_{max}$, $\left(\frac{1}{\gamma_1}, \frac{r_1}{d_o}\right)_{min}$ punktów ekstremum krzywej dla względnego

promienia r₁/d_o przedstawiono graficznie na rys. 56 i 57.







Fig. 56. The effect of D/d_o factor on
$$\left(\frac{1}{\gamma_1}, \frac{\mathbf{r}_1}{\mathbf{d}_o}\right)_{\text{min}}$$
 coordinates





Rys. 57. Wpływ wskaźnika D/d_o na współrzędne
$$\left(\frac{1}{\gamma_1}, \frac{r_1}{d_o}\right)_{max}$$

Fig. 57. The effect of D/d_o factor on $\left(\frac{1}{\gamma_1}, \frac{r_1}{d_o}\right)_{max}$ coordinates

Z przedstawionych na rys. 56 i 57 zależności wynika, że dla stosowanego w badaniach wskaźnika D/d_o \in [12, 106] i współczynnika gniotu $\gamma_1 \in$ [1,0 ; 0,5] maksymalny promień zarysu powierzchni swobodnej pasma $\frac{\mathbf{r}_1}{\mathbf{d}_o}\Big|_{max}$ płaszczonego drutu zmienia się w zależności od wskaźnika D/d_o wg krzywej wykładniczej, malejącej w bardzo niewielkim zakresie [0.50105 \div 0.50127] oraz odpowiada odkształceniom z przedziału $\frac{1}{\gamma_1}\Big|_{max} \in$ [1,0065÷1,0087]. Analogiczne zależności (rys. 56) dla minimalnego promienia zarysu powierzchni swobodnej $\frac{\mathbf{r}_i}{\mathbf{d}_o}\Big|_{min}$ zmieniają się w dużo większym stopniu, wg krzywej wykładniczej rosnącej w zakresie $\frac{\mathbf{r}_i}{\mathbf{d}_o}\Big|_{min} \in$ [0,340÷0,385] dla gniotu odpowiadającego wartościom $\frac{1}{\gamma_1} \in$ [1,765÷1,880]. Wyznaczone metodą najmniejszej sumy kwadratów parametry funkcji wykładniczej opisującej powyższe zależności zamieszczono na rys. 56 i 57.

W procesie wieloprzepustowego płaszczenia pasma okrągłego kształt powierzchni styku metalu z walcem w kotlinie walcowniczej w i- tych przepustach przedstawiono na rys. 58.



Rys. 58. Kształty powierzchni styku metalu z walcami w procesie wieloprzepustowego płaszczenia drutu Fig. 58. The shape of contact surface of metal with rolls during the process of multi pass flattening of wire

W przepustach od i ≥ 2 rzut krzywej granicznej pomiędzy powierzchnią styku metalu z walcem a zarysem powierzchni swobodnej na płaszczyznę walcowania jest częścią paraboli. W przepuście i = 1 jest parabolą. Dla tej fazy płaszczenia zależność stosunku b_{s1}/b₁ od 1/ γ_1 opisano równaniem (74). W celu potwierdzenia prawidłowości opisu wg wzoru (74) zależności stosunku b_{si}/b_i od (1/ γ_{ci}) dla przepustów i ≥ 2 wykonano badania. Na niedowalcowanych w przepustach i = 2 i i = 3 ze stali niskowęglowej pasmach zmierzono grubość (h_x) i szerokości (b_{sx}, b_x) na długości kotliny walcowania w trzech prostopadłych kierunkach względem siebie (analogicznie jak dla przepustu i = 1, rys. 49). Opracowane wyniki badań stosunku b_{sx}/b_x od odwrotności bieżącego współczynnika gniotu (1/ γ_{cx}) w i- tym przepuści przedstawiono na rys. 59 i 60.



Rys. 59. Zależność stosunku b_{sx}/b_x od odwrotności współczynnika gniotu wzdłuż kotliny walcowniczej podczas płaszczenia pasma płaskiego o wymiarach $h_1 x b_1 = 3,92 x 4,89$ mm (otrzymane po płaszczeniu drutu o średnicy $d_o = 4,89$ mm ze stali niskoweglowej) gniotem $\varepsilon_h=0,28$ między walcami o średnicy D=100 mm Fig. 59. The dependence of b_{sx}/b_x ratio upon the inverse of draft coefficient along the rollgap during flattening of a flat band of $h_1 x b_1 = 3.92 x 4.89$ mm dimensions using $\varepsilon_h = 0,28$ draft with rolls of D =100 mm diameter (the flat band of such dimensions has been obtained in the process of flattening the wire of $d_o = 4.89$ mm dimension made of low carbon steel)

Analizując zależność rozkładu stosunku b_{sx}/b_x od $1/\gamma_{cx}$ w przepuście i = 3 (rys. 59 i 60), stwierdzono, że rozkłady te opisane według wzoru (74) wykazują większe wartości od rzeczywistych i są tym większe, im mniejsze są wartości całkowitego współczynnika gniotu. Z tych względów podjęto kolejną próbę opracowania nowej zależności pozwalającej przewidywać wartość stosunku b_{si}/b_i w zależności od $1/\gamma_{ci}$.

and the second second second second in the second second



- Rys. 60. Zależność stosunku b_{xx}/b_x od odwrotności współczynnika gniotu wzdłuż kotliny walcowniczej podczas płaszczenia pasma płaskiego o wymiarach $h_2 x b_2 = 2,84 x 5,99 \text{ mm}$ ze stali niskowęglowej gniotem $\varepsilon_b = 0,25 \text{ między walcami o średnicy } D = 100 \text{ mm}$
- Fig. 60. The dependence of b_{sx}/b_x ratio upon the inverse of draft coefficient along the rollgap during the process of flattening of a flat band of $h_2 \ge 0.84 \ge 0.99$ mm dimensions using $\varepsilon_h = 0.25$ draft with rolls of D = 100 mm diameter

Wykazano, że podczas płaszczenia drutu okrągłego zmiana wartości stosunku b_{s1}/b_1 jest niezależna od średnicy drutu płaszczonego i średnicy walców, a wskaźnik kształtu pasma $\delta = 1$. Podczas płaszczenia pasma płaskiego wartość wskaźnika kształtu pasma jest większa od jedności ($\delta > 1$). Można zatem wnioskować, że wartość stosunku b_{si}/b_i w zależności od gniotu będzie zależna od wielkości grubości i szerokości pasma po danym odkształceniu. Wzdłuż kotliny walcowniczej, dla przepustu i = 2, zależność rozkładu stosunku b_{sx}/b_x od stosunku h_x/b_x przedstawiono na rys. 61. Wynika z niego, że rozkład ten jest paraboliczny, a funkcja opisująca związek ma postać:

$$\frac{b_{sx}}{b_x} = \sqrt{1 - \frac{h_x}{b_x}}$$

(80)

Obliczone wartości rozkładu b_{sx}/b_x według wzoru (80) w zależności od stosunku h_x/b_x przedstawiono na rys. 61. Obliczony współczynnik korelacji (R) pomiędzy wartościami zmierzonymi b_{sx}/b_x a obliczonymi wzorem (80) był równy 0,9986.



Rys. 61. Zależność stosunku b_{sx}/b_x od stosunku h_x/b_x wzdłuż kotliny walcowniczej podczas płaszczenia pasma płaskiego dla danych jak na rys. 60

Fig. 61. The dependence of b_{sxi}/b_{xi} ratio upon h_{xi}/b_{xi} along the rollgap during the process of flattening of a flat band for data shown in Fig. 60

Zależność (80) dla przepustu i = n przyjmuje postać:

$$\frac{\mathbf{b}_{\mathrm{sn}}}{\mathbf{b}_{\mathrm{n}}} = \sqrt{1 - \frac{\mathbf{h}_{\mathrm{n}}}{\mathbf{b}_{\mathrm{n}}}} \tag{81}$$

Korzystając z zależności (36) na grubość i szerokość (h_n i b_n) pasma po n – tym przepuście oraz po jej podstawieniu do wzoru (81) i przekształceniu otrzymuje się postać równania:

$$\frac{\mathbf{b}_{\mathrm{sn}}}{\mathbf{b}_{\mathrm{n}}} = \sqrt{1 - \frac{\gamma_{\mathrm{cn}}}{\beta_{\mathrm{cn}}}} \tag{82}$$

opisujcego stosunek b_{sn}/b_n po płaszczeniu drutu okrągłego w przepustach od i = 1 do i = n. Wartość stosunku jest zależna od wartości całkowitego współczynnika gniotu i całkowitego współczynnika poszerzenia, a zatem gniotu i poszerzenia, jakiego doznało płaszczone pasmo po n – tym przepuście.

Wstawiając równanie (82) do równania (38) otrzymano zależność w postaci:

$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{d}_{o}}{4} \left[\frac{\gamma_{cn}^{2}}{\beta_{cn} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\gamma_{cn}}{\beta_{cn}}} \right)} + \beta_{cn} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\gamma_{cn}}{\beta_{cn}}} \right) \right]$$
(83)

opisującą zmianę promienia zarysu powierzchni swobodnej dla wieloprzepustowego płaszczenia drutu okrągłego między walcami.

4.9. Symulacja procesu płaszczenia drutów na zimno metodą elementów skończonych

4.9.1. Własności mechaniczne materiału i warunki brzegowe symulacji procesu

Analizie numerycznej poddano proces płaszczenia drutu o średnicy $d_0 = 3,91$ mm ze stali niskowęglowej w gatunku C4D w pięciu przepustach, zgodnie ze schematem przedstawionym w tablicy 21.

Tablica 21

Schemat przepustów w symulacji procesu płaszczenia drutu o średnicy $d_0 = 3.91$ mm między walcami o średnicy D = 100 mm

| Nr | Odstęp pomiędzy | Gniot względny | Współ. gniotu | |
|-----------|-----------------------------|-----------------|----------------|--|
| przepustu | walcami s _o , mm | ε _{hi} | γ _i | |
| 1 | 3,128 | 0,20 | 0,80 | |
| 2 | 2,346 | 0,25 | 0,75 | |
| 3 | 1,806 | 0,23 | 0,77 | |
| 4 | 1,446 | 0,20 | 0,80 | |
| 5 | 1,157 | 0,20 | 0,80 | |

Do analizy numerycznej procesu walcowania metodą elementów skończonych [43] wykorzystano pakiet programowy FORGE 3 [69] opracowany w Ecole des Mines w Paryżu. Przyjęto sztywny model walców o średnicy D = 100 mm i stałą prędkość kątową walców wynoszącą $\omega = 2$ rd/s, tzn. zbliżoną do wartości prędkości walcowania stosowanej w próbach laboratoryjnego płaszczenia drutów. Proces wieloprzepustowego płaszczenia realizowano na zimno. Do symulacji komputerowej przyjęto stałą początkową temperaturę materiału odkształcanego i narzędzi oraz otoczenia wynoszącą 20°C. Własności mechaniczne odkształcanego materiału opisano za pomocą sprężysto-plastycznego modelu odkształcanego ciała. Przyjęto wartość modułu Younga równą E = 220000 MPa oraz współczynnik Poissona v = 0,3. Krzywą umocnienia stali wyrażono funkcją

$$\sigma_{\rm p} = \sqrt{3} K_{\rm o} (\phi_{\rm oi} + \phi_{\rm i})^{\rm n} \tag{84}$$

Stałą materiałową K_o i wykładnik umocnienia n dla stali w gat. C4D wyznaczono w próbie rozciągania zgodnie z metodyką przedstawioną w pracy [20]. Do obliczeń przyjęto: $K_o = 344$ MPa, n = 0,272 i $\phi_{o1} = 0,0001$ (dla odkształcenia w pierwszym przepuście). Początkowe odkształcenie ϕ_{oi} uwzględnia w kolejnych przepustach efekt umocnienia materiału. Wartość ϕ_{oi} obliczono z zależności: $\phi_{\rm oi} = \ln \frac{S_{\rm i-1}}{S_{\rm i}}$

a jej wyniki zamieszczono w tablicy 22.

Tablica 22

Wartości początkowego odkształcenia φ_{oi} , dla krzywej umocnienia opisanej wg zależności (84) w kolejnych przepustach płaszczenia

drutu o średnicy $d_0 = 3,91$ mm ze stali w gat. C4D

| Nr | Pole powierzchni przel | kroju poprzecznego | Wartość |
|-----------|------------------------|---------------------|------------------|
| przepustu | przed przepustem | po przepuście | początk. odkszt. |
| i | S _{i-1} , mm | S _i , mm | φ _{oi} |
| 2 | 12,004 | 11,204 | 0,07 |
| 3 | 11,204 | 9,884 | 0,19 |
| 4 | 9,884 | 8,468 | 0,35 |
| 5 | 8,468 | 7,376 | 0,49 |

Tarcie w strefie kontaktu narzędzie – odkształcany materiał modelowane jest poprzez Coulombowski model tarcia. Na podstawie wyników badań [3, 45, 49] przyjęto dla wszystkich przepustów stałą wartość współczynnika tarcia $\mu = 0,09$. W celu określenia sposobu oddziaływania tarcia na poszerzenie dodatkowo symulowano proces płaszczenia pasma w drugim i czwartym przepuście dla wartości współczynnika tarcia równej 0,06 i 0,11. Wsad modelowano czterowęzłowymi elementami czworościennymi.

4.9.2. Wyniki komputerowej symulacji

Analizowano opracowany model procesu wieloprzepustowego płaszczenia na zimno drutu okrągłego, przeprowadzając obliczenia wpływu parametrów na wynik symulacji. W ramach wykonanych obliczeń wyznaczono zmianę zarysu przekroju poprzecznego pasma po przepuście, zmianę zarysu przekroju poprzecznego wzdłuż kotliny walcowniczej podczas płaszczenia drutu okrągłego i pasma płaskiego oraz odpowiednio dla tych schematów walcowania rozkłady: składowych normalnych naprężeń, intensywności odkształcenia i składowych prędkości płynięcia metalu.

Uzyskane z symulacji kształty przekroju poprzecznego pasma oraz ich wymiary po i-tym przepuście przedstawiono na rys.62. Na podstawie wymiarów pasma obliczone wartości współczynników odkształcenia w i-tym przepuście zestawiono w tablicy 23. Wartość promienia powierzchni swobodnej pasma po przepuście wyznaczono za pomocą

(85)

aproksymacji współrzędnych punktów opisujących zarys powierzchni swobodnej przekroju poprzecznego pasma. Stosowano metodę najmniejszych kwadratów.



Rys. 62. Kształty przekroju poprzecznego pasma po kolejnych przepustach uzyskane w symulacji procesu wieloprzepustowego płaszczenia drutu okragłego ze stali w gat. C4D między walcami o średnicy D =100 mm
Fig. 62. The shapes of the lateral section of a band after successive roll passes obtained in the simulation of multi pass flattening the round wire made of C4D steel grade with rolls of D = 100 mm diameter Wymiary zarysu przekroju poprzecznego pasma i współczynniki odkształcenia uzyskane w symulacji MES procesu wieloprzepustowego płaszczenia drutu okragłego

| Nr | Wymiary | y przekroju p | oprzecznego | pasma | Współczynniki odkształcenia | | | | |
|-----------|--------------------------|---------------|--------------------------------|-------|-----------------------------|-----------------|-----------------|--|--|
| przepustu | orzepustu h _i | | b _i b _{si} | | γi | γ _{ci} | β _{ci} | | |
| | mm | mm | mm | mm | | | | | |
| 0 | 3,910 | 3,910 | 0 | 1,955 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | | |
| 1 | 3,140 | 4,154 | 1,912 | 1,702 | 0,803 | 0,803 | 1,062 | | |
| 2 | 2,360 | 4,580 | 3,166 | 1,350 | 0,752 | 0,604 | 1,171 | | |
| 3 | 1,817 | 4,980 | 3,855 | 1,053 | 0,770 | 0,465 | 1,274 | | |
| 4 | 1,459 | 5,310 | 4,391 | 0,855 | 0,803 | 0,373 | 1,358 | | |
| 5 | 1,169 | 5,617 | 5,029 | 0,700 | 0,801 | 0,299 | 1,437 | | |

Grubości pasma (tabl. 23) z symulacji procesu płaszczenia drutu są nieznacznie większe w stosunku do założonego odstępu między walcami (tabl.21). Różnica ta wynika z przyjętego modelu ciała sprężysto-plastycznego. W materiale po walcowaniu zachodzi odwracalne odkształcenie sprężyste i następuje zwiększenie grubości pasma. Po danym przepuście ze wzrostem całkowitego gniotu szerokość styku metalu z walcem i szerokość maksymalna pasma zwiększają się, a promień powierzchni swobodnej maleje (rys. 62 i tabl.23).

Wyniki symulacji zmiany kształtu przekroju poprzecznego (analizowano jedną ćwiartkę przekroju z uwagi na jego podwójną symetrię) dla wybranych przekrojów wzdłuż kotliny walcowniczej podczas płaszczenia drutu okrągłego przedstawiono na rys. 63. Wzdłuż kotliny walcowniczej ze wzrostem gniotu następuje zmniejszanie grubości pasma oraz wzrost szerokości styku metalu z walcem i szerokości pasma – mierzonej w osi symetrii poprzecznej przekroju nr 4 -1. Tuż przed płaszczyzną wejścia (przekrój nr 5) przedstawiono poprzeczny przekrój drutu okrągłego.

Przykładowe wyniki symulacji rozkładu składowych normalnych naprężeń dla procesu jednoprzepustowego płaszczenia na zimno drutu okrągłego w pasmo płaskie podczas walcowania gniotem względnym 0,20 przedstawiono na rys. 64 ÷ 68.

Tablica 23





- Rys. 63. Zmiana kształtu poprzecznego pasma na długości kotliny walcowniczej podczas płaszczenia drutu okragłego w walcach o średnicy D = 100 mm
- Fig. 63. The change of the lateral profile of a band along the rollgap during the process of flattening of the round wire with rolls of D = 100 mm diameter



- Rys. 64. Rozkład składowej normalnej naprężenia
 σ_x [MPa] na przekroju wzdłużnym podczas płaszczenia drutu okragłego gniotem względnym 0,20
- Fig. 64. The distribution of σ_x [MPa] normal stress component in a longitudinal section during the process of flattening of the round wire with 0.20 relative draft



- Rys. 65. Rozkład składowej normalnej naprężenia σ_x [MPa] na przekrojach poprzecznych kotliny walcowniczej podczas płaszczenia drutu okrągłego gniotem względnym 0,20
- Fig. 65. The distribution of σ_x [MPa] normal stress component in lateral sections of a rollgap during the process of flattening of the round wire with 0.20 relative draft

| Automum 3.016E+02 | | | |
|--|-------------|-----------------------|---|
| > 2.297E+02 | | | |
| > 1.578E+02 | | | |
| > 8.596E+01 | | | |
| > 1.411E+01 | | | |
| > -5.776E+01 | | | |
| > -1.296E+02 | | | |
| > -2.015E+02 | | | and the second se |
| | ALC: NOT | | |
| | | | |
| | | and the second second | |
| > 4 BVCE + 02 | | | |
| > 4.307E+00 | | | |
| and the second sec | f | | |
| > -7.046E+02 | | | |
| > -7.046E+02 | <u>k</u> _x | | |

- Rys. 66. Rozkład składowej normalnej naprężenia σ_z [MPa] na przekroju wzdłużnym podczas płaszczenia drutu okrągłego gniotem względnym 0,20
- Fig. 66. The distribution of σ_z [MPa] normal stress component in a longitudinal section during the process of flattening of the round wire with 0.20 relative draft



- Rys. 67. Rozkład składowej normalnej naprężenia σ_z [MPa] na przekrojach poprzecznych kotliny walcowniczej podczas płaszczenia drutu okrągłego gniotem względnym 0,20
- Fig. 67. The distribution of σ_z [MPa] normal stress component in lateral sections of a rollgap during the process of flattening of the round wire with 0.20 relative draft



Rys. 68. Rozkład składowej normalnej naprężenia σ_y [MPa] na przekroju poprzecznym kotliny walcowniczej podczas płaszczenia drutu okrągłego gniotem względnym 0,20
 Fig. 68. The distribution of σ_y [MPa] normal stress component in a lateral section of a rollgap during the process

ng. os. The distribution of σ_y [Mra] formal stress component in a lateral section of a rongap during the process of flattening of the round wire with 0.20 relative draft

Na rys. 64 i 65 przedstawiono zmiany składowej normalnej naprężenia σ_x , odpowiednio na przekroju wzdłużnym pasma w kierunku walcowania i na wydzielonych przekrojach poprzecznych. W wyniku nacisku walców na materiał, prawie w całym przekroju wzdłużnym pasma w kotlinie walcowniczej, występują naprężenia ściskające, przy czym największe wartości naprężenia są pod walcami w strefie opóźnienia, a najmniejsze w osi wzdłużnej pasma. Naprężenia rozciągające występują w warstwach niezgniatanych - warstwy podpowierzchniowe ograniczone powierzchnią swobodną (rys. 65). Ich maksymalne wartości występują tuż pod powierzchnią swobodną (przekroje 2, 3 i 4). Na kolejnym przekroju wzdłużnym (rys. 66) i wydzielonych przekrojach poprzecznych do kierunku walcowania (zgodnie z rys. 63) przedstawiono rozkład składowej normalnej naprężenia σ_z (rys. 67). Naprężenia ściskające występują prawie na całym przekroju wzdłużnym i lokalnych przekrojach poprzecznych. Na przekrojach poprzecznych wzdłuż kotliny walcowniczej pojawiają się naprężenia rozciągające w cienkiej warstwie przy powierzchni swobodnej.

Rozkład składowej normalnej naprężenia σ_y na wybranych przekrojach poprzecznych pasma wzdłuż kotliny walcowniczej pokazano na rys. 68. W rozpatrywanych przekrojach w wyniku nacisku walców na materiał występują naprężenia ściskające z wyjątkiem strefy centralnej, w której pojawiają się naprężenia rozciągające. Strefa ta w płaszczyźnie wejścia ma kształt zbliżony do kołowego, po czym ze wzrostem gniotu ulega znacznemu spłaszczeniu - zmniejsza się jej grubość, a wzrasta szerokość.

Z analizy rozkładu składowych normalnych naprężeń w kotlinie walcowniczej można wnioskować, że w centralnej strefie przekroju poprzecznego pasma występuje niekorzystny stan naprężenia dla osiągnięcia dużych odkształceń plastycznych materiału bez utraty spójności, gdyż jedno ze składowych normalnych naprężeń jest rozciągające. W pozostałym obszarze, z wyjątkiem bardzo małej strefy przypowierzchniowej do powierzchni swobodnej, występują normalne naprężenia ściskające, co jest korzystne dla badanego procesu płaszczenia.

Wyniki symulacji zmiany kształtu przekroju poprzecznego dla wybranych przekrojów wzdłuż kotliny walcowniczej podczas płaszczenia pasma płaskiego w czwartym przepuście przedstawiono na rys. 69. Wzdłuż kotliny walcowniczej ze wzrostem gniotu następuje zmniejszanie grubości pasma oraz wzrost szerokości styku metalu z walcem i szerokości pasma (przekrój nr $4 \div 1$).

Przykładowe wyniki symulacji rozkładu składowych normalnych naprężeń podczas płaszczenia pasma płaskiego w czwartym przepuście gniotem względnym 0,20 przedstawiono na rys. 70 + 74.



Rys. 69. Zmiana kształtu poprzecznego pasma na długości kotliny walcowniczej podczas płaszczenia pasma płaskiego w przepuście 4

Fig. 69. The change of lateral profile of a band along the rollgap during the process of flattening of a flat band in no 4 roll pass



- Rys. 70. Rozkład składowej normalnej naprężenia σ_x [MPa]na przekroju wzdłużnym podczas płaszczenia pasma płaskiego gniotem względnym 0,20 w przepuście 4
- Fig. 70. The distribution of σ_x [MPa] normal stress component in longitudinal section during the process of flattening of a flat band with 0.20 relative draft in no 4 roll pass



- Rys. 71. Rozkład składowej normalnej naprężenia σ_x [MPa] na przekrojach poprzecznych podczas płaszczenia drutu gniotem względnym 0,20 w przepuście 4
- Fig. 71. The distribution of σ_x [MPa] normal stress component in lateral sections during the process of flattening of the wire with 0.20 relative draft in no 4 roll pass



- Rys. 72. Rozkład składowej normalnej naprężenia σ_z [MPa] na przekroju wzdłużnym podczas płaszczenia pasma płaskiego gniotem względnym 0,20 w przepuście 4
- Fig. 72. The distribution of σ_z [MPa] normal stress component in a longitudinal section during the process of flattening of the flat band with 0.20 relative draft in no 4 roll pass



- Rys. 73. Rozkład składowej normalnej naprężenia σ_z [MPa] na przekroju poprzecznym podczas płaszczenia pasma płaskiego gniotem względnym 0,20 w przepuście 4
- Fig. 73. The distribution of σ_z [MPa] normal stress component in a lateral section during the process of flattening of a flat band with 0.20 relative draft in no 4 pass



Rys. 74. Rozkład składowej naprężenia normalnego σ_y [MPa] na przekroju poprzecznym podczas płaszczenia pasma płaskiego gniotem względnym 0,20 w przepuście 4

Fig. 74. The distribution of σ_y [MPa] normal stress component in a lateral section during the process of flattening of a flat band with 0.20 relative draft in no 4 roll pass

Na rys. 70 przedstawiono zmiany składowej normalnej naprężenia σ_x na przekroju wzdłużnym pasma w kierunku walcowania podczas płaszczenia pasma płaskiego gniotem względnym 0,20. W kotlinie walcowniczej cały przekrój wzdłuż osi pasma podlega naprężeniom ściskającym, przy czym największe wartości naprężenia występują pod walcami w środkowym obszarze kotliny walcowniczej i tuż za płaszczyzną wejścia przy powierzchni. Również na przekrojach poprzecznych do kierunku walcowania (rys. 71) występują normalne naprężenia ściskające z wyjątkiem strefy podpowierzchniowej powierzchni swobodnej (przekroje 3 i 2), w której są naprężenia rozciągające. Na kolejnym przekroju wzdłużnym (rys. 72) i wydzielonych przekrojach poprzecznych do kierunku walcowania (zgodnie z rys. 69) przedstawiono rozkład składowej normalnej naprężenia σ_z (rys. 73). Naprężenia ściskające występują na całym przekroju wzdłużnym i lokalnych przekrojach poprzecznych, przy czym ich maksymalne wartości występują w obszarach centralnych przekrojów poprzecznych i maleją w kierunku powierzchni swobodnej.

Zmiany składowej normalnej naprężenia σ_y w kierunku szerokości na wybranych przekrojach poprzecznych pasma wzdłuż kotliny walcowniczej pokazano na rys. 74. W rozpatrywanych przekrojach występują naprężenia ściskające oraz naprężenia rozciągające o małej wartości w cienkiej strefie przypowierzchniowej i w płaszczyźnie poziomej. Podczas płaszczenia pasma płaskiego rozkład składowych naprężeń normalnych na analizowanych przekrojach kotliny walcowniczej jest bardziej równomierny w stosunku do odpowiednich rozkładów naprężeń przy płaszczeniu pasma o przekroju kołowym.

Przykładowe zmiany rozkładów intensywności odkształcenia na przekroju poprzecznym kotliny walcowniczej tuż za płaszczyzną wyjścia zaprezentowano na rys. 75. Na rysunku tym przedstawiony skutek po pierwszym przepuście płaszczenia drutu okrągłego nierównomiernym gniotem na szerokości i po kolejnych przepustach płaszczenia pasma płaskiego równomiernym gniotem na szerokości. W pierwszym przepuście największe odkształcenia występują pod walcami i w centralnej części przekroju tworząc trójkątną strefę. Od tej strefy w stronę powierzchni swobodnej pasma odkształcenia lokalne maleją, osiągając najmniejsze wartości w warstwie podpowierzchniowej. W kotlinie walcowniczej im mniejsza będzie strefa (obszar zawarty pomiędzy szerokościami styku metalu z walcami) odkształcana między walcami, tym większe będzie oddziaływanie stref bocznych (nieodkształcane bezpośrednio przez walce) na charakter płynięcia metalu. Im większe będzie pole powierzchni stref bocz-nych, tym w większym stopniu będą ograniczać wydłużanie pasma kosztem zwiększania poszerzenia.





Rys. 75. Rozkład intensywności odkształceń na przekroju poprzecznym pasma podczas wieloprzepustowego płaszczenia drutu d_o = 3,91 mm między walcami D = 100 mm przy uwzględnieniu zadanej wartości odkształcenia w poprzedzającym przepuście

Fig. 75. The distribution of deformation intensity in a lateral section of a band during multi pass flattening of wire of $d_0 = 3.91$ mm diameter with rolls of D = 100 mm diameter taking into account the assigned value of deformation in the previous roll pass

W kolejnych przepustach wieloprzepustowego płaszczenia drutu (przepusty 2 ÷ 5) uwzględniane jest doznane umocnienie materiału w przepustach poprzedzających. Po odkształceniu materiału w drugim przepuście na przekroju można wyodrębnić trzy charakterystyczne obszary, jakie występują w przypadku spęczania próbki cylindrycznej [52]. Obszary te, w postaci zbliżonej do trójkątów, przylegają do powierzchni walca oraz do powierzchni swobodnej. Obszar pomiędzy nimi to obszar o największym odkształceniu. W miarę wzrostu całkowitego gniotu podczas płaszczenia stan ten ulega zmianie, prowadząc do ujednorodnienia w obszarze między walcami (przepust 3), a następnie do zmniejszenia niejednorodności odkształcenia na całym przekroju poprzecznym (przepusty 4 i 5). Z przedstawionych zmian rozkładu intensywności odkształcenia na przekroju poprzecznym wynika, że jego ujednorodnienie następuje podczas płaszczenia pasma gniotem równomiernym na szerokości, gdy wartość stosunku średniej wysokości do długości rzutu łuku styku metalu z walcem m (h_ś / l_d) jest mniejsza od 0,40, a to ma miejsce przy $\varepsilon_{hc} \ge 0,60$. W takim przypadku płynięcie metalu zbliża się do jednorodnego [44].

Przykładowe wyniki symulacji rozkładu składowych prędkości płynięcia ($v_x i v_y$) metalu przedstawiono na rys. 76 ÷ 79.



- Rys. 76. Rozkład składowej prędkości v_{x1}[mm/s] płynięcia metalu na przekroju wzdłużnym podczas płaszczenia drutu okrągłego gniotem względnym 0,20
- Fig. 76. The distribution of v_x [mm/s] velocity component of metal flow in longitudinal section during the process of round wire flattening with 0.20 relative draft



- Rys. 77. Rozkład składowej prędkości v_y, [mm/s] płynięcia metalu na przekrojach poprzecznych kotliny walcowniczej podczas płaszczenia drutu okrągłego gniotem względnym 0,20
- Fig. 77. The distribution of $v_{y,}$ [mm/s] velocity component of metal flow in a lateral section of a rollgap during the process of round wire flattening with 0.20 relative draft



- Rys. 78. Rozkład składowej prędkości v_s,[mm/s] płynięcia metalu na przekroju wzdłużnym podczas płaszczenia pasma płaskiego gniotem względnym 0,20 w przepuście 4
- Fig. 78. The distribution of v_{x_1} [mm/s] velocity component of metal flow in longitudinal section during the process of flattening of a flat band with 0.20 relative draft in no 4 roll pass



Rys. 79. Rozkład składowej prędkości v_y, [mm/s] płynięcia metalu na przekroju poprzecznym podczas płaszczenia pasma płaskiego w przepuście 4

Fig. 79. The distribution of v_y,[mm/s] velocity component of metal flow in lateral section during the process of flattening of a flat band in no 4 pass

Podczas płaszczenia drutu okrągłego z nierównomiernym gniotem na szerokości rozkład składowej prędkości v_x płynięcia metalu na przekroju wzdłużnym w kierunku walcowania (rys. 76), od płaszczyzny wejścia do płaszczyzny wyjścia, wykazuje pewne cechy charakterystyczne. Obserwuje się wygięcie obszarów o stałej prędkości v_x w kierunku walcowania w strefie opóźnienia i w kierunku przeciwnym do kierunku walcowania w strefie opóźnienia i w kierunku przeciwnym do kierunku walcowania w strefie wyprzedzenia. Na grubości pasma w strefie opóźnienia przypowierzchniowe warstwy metalu wykazują większą prędkość v_x płynięcia niż środkowe. Odwrotnie w strefie wyprzedzenia środkowe warstwy metalu posiadają większą prędkość v_x niż przypowierzchniowe. Tuż za płaszczyzną wejścia występuje lokalny gradient prędkości v_x o znacznie mniejszej wartości od prędkości wejścia. Przed płaszczyzną wejścia prędkość v_x metalu jest mniejsza od prędkości liniowej walców 100 mm/s. Odwrotnie, za płaszczyzną wejścia metal wykazuje stała prędkość v_x większą od prędkości liniowej walców.

Rozkład składowej prędkości v_y płynięcia metalu w kierunku szerokości pasma na wydzielonych przekrojach poprzecznych wzdłuż kotliny walcowniczej przedstawiono na rys. 77. Widoczne jest silne zróżnicowanie prędkości v_y ze wzrostem gniotu, co szczególnie ma miejsce w lokalnych przekrojach 4 i 3. W osi symetrii pionowej przekroju warstwy środkowe oraz stykające się z walcami posiadają mniejszą prędkość płynięcia w kierunku szerokości, co

Tablica 24

sugeruje, że bardziej się wydłużają. Warstwy zlokalizowane od powierzchni swobodnej do osi pionowej symetrii przekroju wykazują większą prędkość v_y w stosunku do środkowych. Oznacza to, że te strefy metalu będą się bardziej poszerzać. W płaszczyźnie wyjścia (przekrój 1) składowa prędkości v_y jest prawie stała i ma najmniejszą wartość (rys. 77).

Podczas płaszczenia pasma płaskiego równomiernym gniotem na szerokości rozkład składowej prędkości v_x płynięcia metalu na przekroju wzdłużnym w kierunku walcowania przedstawiono na rys. 78. Obserwuje się narastające wygięcie obszarów o stałej prędkości v_x od płaszczyzny podziałowej tak w strefie opóźnienia, jak i w mniejszym stopniu w strefie wyprzedzenia. Na grubości pasma w krótkiej strefie opóźnienia podpowierzchniowe warstwy wykazują większą prędkość v_x płynięcia niż środkowe. W wydłużonej strefie wyprzedzenia występuje na grubości mniejsze zróżnicowanie prędkości v_x , a warstwy podpowierzchniowe posiadają nieco większą prędkość niż środkowe. Pomiędzy sąsiadującymi polami prędkości o przeciwnych wygięciach występuje płaszczyzna podziałowa.

Rozkład składowej prędkości v_y płynięcia metalu w kierunku szerokości pasma na wydzielonych przekrojach poprzecznych wzdłuż kotliny walcowniczej przedstawiono na rys. 79. Na przekrojach widoczne jest zróżnicowanie prędkości v_y ze wzrostem gniotu, co szczególnie ma miejsce w lokalnym przekroju 3. Wartość składowej prędkości płynięcia metalu na grubości pasma od osi symetrii pionowej w stronę powierzchni swobodnej narasta stopniowo. Oznacza to, że warstwy przylegające do powierzchni swobodnej będą się bardziej poszerzać niż centralne, co świadczy o nierównomierności poszerzenia metalu na szerokości.

Podczas płaszczenia pasma płaskiego rozkład składowych prędkości v_x i v_y płynięcia metalu na analizowanych przekrojach wzdłużnym i poprzecznym kotliny walcowniczej jest bardziej równomierny w stosunku do odpowiednich rozkładów składowych prędkości płynięcia metalu przy płaszczeniu pasma o przekroju kołowym.

Wyniki wpływu tarcia na poszerzenie w modelowaniu MES procesu płaszczenia pasma płaskiego w przepustach drugim i czwartym przedstawiono w tablicy 24. Dodatkowe symulacje przeprowadzono z założonym współczynnikiem tarcia 0,06 i 0,11, a więc o wartości mniejszej i większej w stosunku do przyjętej wartości 0,09 w modelowaniu wieloprzepustowego płaszczenia drutu okrągłego. Wpływ tarcia na wartość poszerzenia pasma w procesie symulacji płaszczenia

pasma płaskiego w przepustach drugim i czwartym

| Współ. | Wymiary pa | isma przed p | rzepustem | Wymiary | pasma po pr | zepuście | Współ. | Stosunek |
|--------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| tarcia | | | | | | poszerz. | b _{s2} /b _{s1} | |
| μ | h ₁ , mm | h ₂ , mm | b ₂ , mm | b _{s2} , mm | β | | | |
| 0,06 | | | 1,912 | | 4,560 | 3,140 | 1,0977 | 1,642 |
| 0,09 | 3,140 | 4,154 | | 2,360 | 4,580 | 3,166 | 1,1026 | 1,656 |
| 0,11 | | | | | 4,610 | 3,240 | 1,1098 | 1,695 |
| | h ₃ , mm | b ₃ , mm | b _{s3} , mm | h ₄ , mm | b ₄ , mm | b _{s4} , mm | | b _{s4} /b _{s3} |
| 0,06 | | | | | 5,300 | 4,399 | 1,0643 | 1,141 |
| 0,09 | 1,817 | 4,980 | 3,855 | 1,459 | 5,310 | 4,397 | 1,0663 | 1,141 |
| 0,11 | | | | | 5,310 | 4,396 | 1,0663 | 1,140 |

Z danych przedstawionych w tablicy 24 wynika, że dla ustalonych warunków procesu płaszczenia w przepustach drugim i czwartym wpływ wartości współczynnika tarcia na współczynnik poszerzenia pasma jest pomijalnie mały. W drugim przepuście przy wzroście współczynnika tarcia z wartości 0,06 do 0,11 przyrost szerokości pasma płaszczonego wyniósł 0,05 mm, a w czwartym przepuście odpowiednio 0,01 mm. Wpływ współczynnika tarcia na szerokość styku metalu z walcami jest podobny jak w przypadku wpływu na szerokość stosunku b_{s2}/b_{s1} zwiększyła się o 0,053, a stosunku b_{s4}/b_{s3} zmniejszyła się o 0,001. Zmiany współczynnika tarcia dla trzech analizowanych wartości (0,06, 0,09 i 0 ,11) nieznacznie wpływają na zmiany poszerzenia. Są one tak małe, że nie mają zasadniczego wpływu na charakter płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, a tym samym są pomijalnie małe w zakresie zmienności badanych wielkości.

5. ANALIZA WYNIKÓW

5.1. Weryfikacja doświadczalna przyjętej zależności opisującej poszerzenie

W procesie jednoprzepustowego płaszczenia drutu okrągłego między walcami gniotem względnym do 0,5 zmiany współczynnika poszerzenia (β) w zależności od parametrów procesu i początkowej średnicy drutu opisano za pomocą wzoru (46) dla drutów ze stali w gatunku C4D oraz równaniami (54 ÷ 56) odpowiednio dla drutów ze stali w gatunkach C20D, C56D i C88D. Dla danego gatunku stali poszerzenie pasma jest zależne od gniotu (1/ γ) oraz wskaźnika D/d_o (rys.26 i 27 dla drutów ze stali w gatunku C4D oraz rys. 37 i 38 dla drutów ze stali w gatunkach C20D ÷ C88D).

O udziale poszerzenia i wydłużenia decydują czynniki oddziałujące na stan naprężenia w kotlinie walcowniczej. W pierwszym przepuście występuje wąska kotlina walcownicza. W takim przypadku, zgodnie z zasadą najmniejszego oporu płynięcia, zachodzą korzystniejsze warunki dla płynięcia metalu w kierunku poprzecznym niż w kierunku wzdłużnym. Ze wzrostem gniotu w przepuście zwiększona objętość odkształcanego metalu jest przemieszczana w większym stopniu w kierunku szerokości niż w kierunku długości pasma. Równocześnie ze wzrostem długości kotliny walcowniczej ściskające wzdłużne naprężenia zwiększają się w wyniku zmiany położenia wypadkowej normalnych i stycznych sił działających w strefie wyprzedzenia i opóźnienia kotliny walcowniczej. Dlatego rosną opory przemieszczania metalu w kierunku wzdłużnym, wskutek czego ze wzrostem przemieszczonej objętości metalu maleje wydłużenie, a zwiększa się poszerzenie.

Dla ustalonych warunków płaszczenia ($\gamma = \text{const}$, d = const) zwiększenie średnicy walców powoduje wzrost długości rzutu łuku styku metalu z walcem (tabl.2, wzór 1), a tym samym ukształtowanie wydłużonej kotliny odkształcenia. Następuje przyrost oporów przemieszczania metalu wzdłuż pasma, zwiększają się wzdłużne naprężenia, maleje wydłużenie, a wzrasta poszerzenie.

Drut płaszczony w walcach o danej średnicy tym bardziej się poszerza, im mniejsza jest jego średnica (rys. 26 i 27). Parametr charakteryzujący geometrię kotliny walcowniczej l_d/h_e rośnie (zgodnie z zależnością (3), tabl. 2), wzrastają opory przemieszczania metalu w kierunku wzdłużnym, a maleją w poprzecznym, wskutek czego następuje wzrost poszerzenia.

Podczas jednoprzepustowego płaszczenia drutów po patentowaniu ze stali w gat. C20D ÷ C88D, przy stałym stosunku D/d_o, druty o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie (ze stali w gat. C88D) poszerzają się bardziej niż druty o mniejszej wytrzymałości (ze stali w gat. C20D) (rys. 37 i 38), co jest w zgodności z wcześniejszymi badaniami [12, 20, 24, 36, 65].

Własnością materiału, mającą wpływ na współczynnik H_j, a tym samym na poszerzenie, jest wielkość bezwymiarowa w postaci stosunku R^*_{\star}/R_m , która charakteryzuje zapas plastyczności materiału [37, 43, 54, 55]. W pracy wykazano, że dla stałego wskaźnika D/d_o współczynnik H_j jest liniowo zależny od stosunku R^*_{\star}/R_m (rys. 46). Współczynnik H_j w zależności od łącznego wpływu obu czynników: D/d_o i R^*_{\star}/R_m opisano równaniem (67). Zmiany współczynnika poszerzenia podczas płaszczenia drutów ze stali węglowych ujmuje wzór (68) autora. Z jego analizy wynika, że wartość poszerzenia podczas płaszczenia drutów ze stali węglowych zależna jest od wartości wskaźnika D/d_o i zapasu plastyczności drutów stosunku R^*_e/R_m .

Dla ustalonych warunków procesu płaszczenia bardziej poszerzają się druty z materiału o wysokiej wartości stosunku R^*_{\bullet}/R_m . Zmiany poszerzenia w funkcji gniotu wynikają prawdopodobnie z różnego stopnia umacniania materiału badanych drutów [20, 37, 40] i sprężystego spłaszczania walców. Podczas płaszczenia drutu następuje umacnianie materiału. Przyrost naprężenia uplastyczniającego zależy od wartości odkształcenia i wartości wykładnika umocnienia. Występujący wzrost naprężenia uplastyczniającego w wyniku odkształcenia powoduje zwiększenie nacisku metalu na walce. Walce podlegają sprężystemu spłaszczeniu, tym większemu im większa ich średnica [7, 56, 59]. W wyniku wzrostu promienia spłaszczonego walca następuje zwiększenie rzutu łuku styku metalu z walcem, a tym samym rośnie geometryczny parametr kształtu kotliny walcowniczej l_d/b_δ . Zwiększają się opory przemieszczania metalu w kierunku wzdłużnym, maleje wydłużenie, a wzrasta poszerzenie.

W procesie wieloprzepustowego płaszczenia pasma płaskiego zmiany całkowitego poszerzenia (β_{cp}) w zależności od parametrów procesu i początkowych wymiarów przekroju poprzecznego pasma płaskiego opisano zależnością (49) dla stali w gat. C4D oraz zależnościami (60, 61 i 62) odpowiednio dla stali w gat. C20, C56D i C88D. W tej fazie płaszczenia pasma płaskiego o stałym wskaźniku kształtu wartość poszerzenia zależna jest od początkowej grubości (h₁) pasma (rys. 29 ÷ 31), średnicy walców (rys. 33 i 41), gniotu w przepuście (rys. 32) i własności wytrzymałościowych (rys. 42). Dla ustalonych warunków płaszczenia pasmo płaskie o danym wskaźniku kształtu tym bardziej się poszerza, im mniejsza jest jego grubość i szerokość (rys. 29 ÷ 31). Podobnie poszerzenie pasma zwiększa się ze wzrostem średnicy walców (rys. 33) lub ze wzrostem gniotu w przepuście (rys. 32).

W trakcie płaszczenia pasma płaskiego w kolejnych przepustach zwiększa się jego szerokość i szerokość kształtu kotliny walcowniczej, a dodatkowo ustala się kształt stref bocznych, decydujących o płynięciu metalu w kierunku poprzecznym. Ze wzrostem stosunku b_{s}/l_{d} , rosną opory przemieszczania metalu w kierunku poprzecznym, w wyniku czego zwiększa się wydłużenie, a maleje poszerzenie.

W pracy wykazano, że podczas płaszczenia stałym gniotem w przepuście drutu okrągłego oraz pasma płaskiego zależność współczynnika H_p od gniotu względnego ε_h jest liniowa (rys. 35). Zależność liniowa występuje również pomiędzy współczynnikiem H_p a wskaźnikiem ln(D/h₁) dla stałego gniotu (rys. 34). O wartości współczynnika H_p decydują następujące wielkości: wskaźnik D/h₁, gniot w przepuście ε_h i zapas plastyczności materiału R^{*}_{*}/R_m. Wpływ ww. wielkości na wartość współczynnika H_p pokazuje zależność (70).

Zależności funkcyjne ujmujące zmianę poszerzenia w procesie wieloprzepustowego płaszczenia drutów z danego gatunku stali: C4D + C88D opisują odpowiednio równania (50 i 63 ÷ 65). Natomiast zależność (71) opisuje zmianę poszerzenia od parametrów procesu płaszczenia i własności wytrzymałościowych drutów ze stali węglowych.

Symulacja procesu płaszczenia drutów metodą elementów skończonych umożliwiła wyznaczenie kształtu przekroju poprzecznego pasma po kolejnych przepustach (rys.62), a tym samym wskaźników odkształcenia i promienia powierzchni swobodnej pasma (tabl.23). Charakter zmian całkowitego współczynnika poszerzenia i promienia powierzchni swobodnej w zależności od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu jest zgodny z wynikami eksperymentalnymi i obliczonymi według zależności (71) i (83) autora.

Obliczone numerycznie zmiany rozkładu intensywności odkształcenia na przekrojach poprzecznych pasma dla wieloprzepustowego płaszczenia drutu wskazują, że jego ujednorodnienie następuje podczas płaszczenia pasma równomiernym gniotem na szerokości, wówczas gdy wskaźnik kształtu kotliny odkształcenia h_ś/l_d < 0,40 (rys. 75). Z porównania rozkładu składowych normalnych naprężeń (σ_x , σ_y , σ_z) na wybranych przekrojach kotliny walcowniczej wynika, że rozkład ten występuje bardziej równomierny podczas płaszczenia pasma płaskiego w stosunku do rozkładu przy płaszczeniu pasma o przekroju kołowym. Podobna prawidłowość występuje w przypadku rozkładu składowych (v_x i v_y) prędkości płynięcia metalu. Weryfikację zależności (71) opisującej poszerzenie podczas wieloprzepustowego płaszczenia drutów przeprowadzono na podstawie wyników eksperymentalnych. Poprawność współczynnika poszerzenia sprawdzano porównując wyniki obliczeń z wynikami pomiaru dla stali węglowych w gatunku: C76D, C66D i C9D. Również według zależności (71) obliczono współczynnik poszerzenia dla stali w gatunku: 1H18N10T i OH23J5. Wyniki pomiarów zaczerpnięto z badań przedstawionych w pracy [54]. W badaniach tych proces płaszczenia drutów przeprowadzono ze smarowaniem (emulsja) przy zastosowaniu małego naciągu i przeciwciągu (ich wartości nie podano w pracy).

Za miarę zgodności wyników przyjęto względny błąd procentowy pomiędzy zmierzonym współczynnikiem poszerzenia a obliczonym wg wzoru (71). Wyniki pomiarów i obliczeń przedstawiono w tablicy 25. Błąd względny tak określony dla stali węglowych w gatunku C76D, C66D i C9D jest mniejszy od 4% niezależnie od początkowej średnicy drutu i średnicy walców. W znacznej większości przepustów jest mniejszy niż 3%.

W przypadku płaszczenia drutów ze stali w gat. 1H18N10T po przesycaniu o strukturze austenitycznej ze wzrostem całkowitego gniotu wartość błędu względnego maleje od około 10,7 do 3%. W zakresie gniotu od 40 do 75% wartość błędu względnego jest mniejsza niż 4% (tabl. 25). W płaszczeniu drutów ze stali w gat. stali OH23J5 po wyżarzaniu rekrystalizującym o strukturze ferrytycznej wartość błędu względnego wynosi od 13,6 do 0,9% (tabl.25), przy czym jego wartość maleje ze wzrostem gniotu. Obliczone wartości współczynnika poszerzenia wg wzoru (71) są z reguły większe niż wartości zmierzonego. Mniejsze wartości zmierzonego w stosunku do obliczonych mogą wynikać ze stosowania naciągu i smarowania emulsją oraz z wysokiej zawartości pierwiastków stopowych w materiale drutów, które wpływają na wartość poszerzenia [54].

Przeprowadzona weryfikacja doświadczalna zależności (71) opisującej poszerzenie w wieloprzepustowym płaszczeniu drutów potwierdza poprawność jej opisu dla stali węglowych. Poprawność ta występuje również w przypadku stali wysokostopowych, w tym dla stali w gat. 1H18N10T, gdy wartość stosunku $R_{0,2}/R_m > 0,6$.

Tablica 25

| Znak | Srednica | Własn. v | wytrzym, | Srednica | Wymian | y pasma | Współ. po | oszerzenia | Bład |
|---------|-----------|------------------|----------------|----------|--------|---------|---|------------|----------|
| stali | drutu d | R _{0.2} | R _m | walców | hi | bi | zmierzony | obliczony | wzgledny |
| | mm | MPa | MPa | D.mm | mm | mm | h: | h.: | % |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| - | - | 5 | | | 2 19 | 3.53 | 1 142 | 1 1 59 | -1 43 |
| | | | | 1.1.1 | 1.52 | 4 11 | 1 330 | 1,100 | 3.02 |
| | 3.09 | 763.1 | 1265.5 | 60 | 1,02 | 4.52 | 1,000 | 1,250 | 3.25 |
| | 5,05 | 100,1 | 1200,0 | | 0.77 | 4.91 | 1,100 | 1,110 | 3.18 |
| | | | | | 0.52 | 5 31 | 1,505 | 1,557 | 2.84 |
| | <u> </u> | | | | 0,04 | | 1,710 | 1,070 | 2,01 |
| 0.000 | | 1111 | | | 2,17 | 3,62 | 1,172 | 1,208 | -3,09 |
| | | | | | 1,51 | 4,22 | 1,366 | 1,386 | -1,52 |
| | 3,09 | 726 | 1170 | 100 | 1,08 | 4,87 | 1,576 | 1,555 | 1,37 |
| _ | | | | | 0,73 | 5,34 | 1,728 | 1,740 | -0,69 |
| | | | | | 0,53 | 5,86 | 1,896 | 1,911 | -0,79 |
| | | | | | | | | 1 | |
| | | | | | 3,42 | 4,25 | 1,068 | 1,080 | -1,13 |
| | | | | | 2,93 | 4,49 | 1,128 | 1,143 | -1,34 |
| | | | | | 2,44 | 4,90 | 1,231 | 1,217 | 1,18 |
| | | | | | 2,10 | 5,24 | 1,317 | 1,280 | 2,75 |
| C76D | 3,98 | 726 | 1170 | 100 | 1,78 | 5,53 | 1,389 | 1,346 | 3,09 |
| | - | | 100 | | 1,53 | 5,72 | 1,437 | 1,410 | 1,87 |
| DINEN | | | | | 1,30 | 6,06 | 1,523 | 1,475 | 3,12 |
| 10016-2 | | | | | 1,09 | 6,31 | 1,585 | 1,544 | 2,59 |
| | | | | | 0,94 | 6,49 | 1,631 | 1,611 | 1,20 |
| | | | | | 0,79 | 6,68 | 1,678 | 1,676 | 0,16 |
| | | | | | | | 1 | | |
| | | | | | 2,81 | 4,64 | 1,166 | 1,183 | -1,51 |
| | | | | | 1,97 | 5,47 | 1,374 | 1,335 | 2,90 |
| | 3,98 | 728,6 | 1218,5 | 100 | 1,38 | 6,07 | 1,525 | 1,486 | 2,57 |
| 1 | 10 Carlos | | | | 0,99 | 6,68 | 1,678 | 1,631 | 2,82 |
| | | | | | 0,69 | 7,25 | 1,822 | 1,780 | 2,29 |
| | | _ | | | 1.02 | 2.76 | 1 110 | 1 010 | 2 72 |
| | 0.0 | | | | 1,82 | 2,70 | 1,109 | 1,213 | -3,72 |
| 1.1 | 226 | 706 4 | 1001.0 | 201 6 | 1,04 | 2,93 | 1,242 | 1,291 | -4,01 |
| | 2,30 | 135,4 | 1231,3 | 201,0 | 1,41 | 3,24 | 1,373 | 1,405 | -2,17 |
| | | | | | 1,10 | 3,38 | 1,517 | 1,544 | -1,80 |
| | | | | | 0,89 | 4,23 | 1,792 | 1,/31 | 3,45 |
| | | | | 1 | 2.04 | 3 52 | 1 | 1 210 | -2.47 |
| | 2.06 | 760.8 | 1162.1 | 103 | 1.46 | 4 13 | 1 305 | 1 386 | 0.68 |
| | 2,90 | 109,0 | 1102,1 | 105 | 1,40 | 4 71 | 1,595 | 1,500 | 2.76 |
| | | | | | 0.70 | 5 32 | 1,391 | 1,547 | 3.13 |
| 066D | | - | | | 0,70 | 5,52 | 1,171 | 1,741 | 5,15 |
| DINEN | - | | | 1 | 2.26 | 3.32 | 1.122 | 1.160 | -3,42 |
| 10016-2 | 2.96 | 769.8 | 1162.1 | 103 | 1,88 | 3.59 | 1,213 | 1,254 | -3.36 |
| | -,- • | ,. | | | 1.47 | 4.06 | 1,372 | 1,374 | -0.15 |
| | | | - | | 0.98 | 4.78 | 1.615 | 1.554 | 3.75 |
| | | | | | 0.68 | 5 30 | 1 791 | 1 734 | 3.18 |

Weryfikacja modelu odkształcania (65) w procesie wieloprzepustowego płaszczenia drutów

cd. tablicy 25

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|--------|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | 1,68 | 2,81 | 1,181 | 1,221 | -3,41 |
| | 2,38 | 271,2 | 372,6 | 103 | 1,16 | 3,32 | 1,395 | 1,420 | -1,77 |
| | | | | | 0,83 | 3,83 | 1,609 | 1,603 | 0,39 |
| | | | | | 0,57 | 4,34 | 1,824 | 1,800 | 1,29 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | 1.000 | 2,18 | 3,36 | 1,135 | 1,178 | -3,77 |
| C9D | | | | | 1,81 | 3,62 | 1,223 | 1,271 | -3,95 |
| | 2,96 | 242,4 | 350,4 | 103 | 1,45 | 3,93 | 1,328 | 1,380 | -3,94 |
| DIN EN | | | | | 1,07 | 4,33 | 1,463 | 1,521 | -3,97 |
| 10016-2 | | | | | 0,68 | 4,97 | 1,679 | 1,714 | -2,08 |
| - | | | | | 1 | 1 | | | |
| | 2.05 | 242.4 | 250.4 | 001 6 | 2,47 | 3,24 | 1,098 | 1,133 | -3,20 |
| 5.000 T | 2,95 | 242,4 | 350,4 | 201,6 | 2,09 | 3,33 | 1,203 | 1,249 | -3,76 |
| | | | | | 1,42 | 4,40 | 1,492 | 1,495 | -0,20 |
| | _ | | | | 0,90 | 5,20 | 1,783 | 1,/51 | 1,81 |
| | - | | | | 1.25 | 2.10 | 1 176 | 1 271 | -8.02 |
| | | | | | 0.94 | 2,10 | 1 345 | 1,271 | _9.02 |
| | 1.785 | 259.9 | 680.7 | 100 | 0.73 | 2,81 | 1,574 | 1,407 | _4 38 |
| | -, | , | | 100 | 0.54 | 3.27 | 1,832 | 1.845 | -0.73 |
| | | 1.7 2 | | | 0.44 | 3.56 | 1,994 | 2.002 | -0.39 |
| | | _ | | | 0.34 | 3.89 | 2,179 | 2.171 | 0.37 |
| - | | | · | | | | , | | |
| | | | | | 1,11 | 1,85 | 1,164 | 1,282 | -10,15 |
| | | | | | 0,85 | 2,12 | 1,333 | 1,472 | -10,42 |
| 1H18N10T | 1,59 | 270,4 | 668,7 | 100 | 0,66 | 2,48 | 1,560 | 1,654 | -6,06 |
| | | | | | 0,50 | 2,85 | 1,792 | 1,850 | -3,21 |
| | | | | | 0,39 | 3,11 | 1,956 | 2,032 | -3,90 |
| L | | | | | 0,30 | 3,41 | 2,145 | 2,217 | -3,39 |
| - | | | | | 0.00 | 1.00 | | 1.000 | 10.60 |
| | | | | | 0,98 | 1,63 | 1,104 | 1,289 | -10,68 |
| - | 1.40 | 200 | 672.2 | 100 | 0,74 | 1,95 | 1,393 | 1,496 | -7,40 |
| | 1,40 | 290 | 072,2 | 100 | 0,37 | 2,23 | 1,007 | 1,090 | -5,10 |
| | | | | | 0.34 | 2,03 | 2 107 | 2,078 | -0,94 |
| | | | | | 0.24 | 3 33 | 2,107 | 2,078 | 2.91 |
| | | | | | 0,24 | 3,55 | 2,515 | 2,512 | 2,01 |
| | | | | | 1.12 | 1,90 | 1,195 | 1.257 | -5.22 |
| | | | | | 0,86 | 2,17 | 1,365 | 1,431 | -4.83 |
| | 1,59 | 445,1 | 658,6 | 100 | 0,65 | 2,44 | 1,535 | 1,613 | -5.12 |
| | | | | | 0,50 | 2,77 | 1,742 | 1,787 | -2,58 |
| | | | | | 0,42 | 3,04 | 1,912 | 1,916 | -0,23 |
| | | | | | | | | | |
| OH23J5 | | | | | 0,84 | 1,38 | 1,169 | 1,268 | -8,42 |
| | 1,18 | 502,9 | 650,2 | 100 | 0,64 | 1,53 | 1,297 | 1,460 | -12,60 |
| | 1 | | | | 0,49 | 1,79 | 1,517 | 1,649 | -8,71 |
| | | | | | 0,37 | 2,05 | 1,737 | 1,846 | -6,25 |
| | | | | | 0,30 | 2,27 | 1,924 | 2,006 | -4,28 |
| | | | | | 0.71 | | | | |
| | 1.40 | 1000 | | 105 | 0,71 | 2,05 | 1,464 | 1,516 | -3,53 |
| | 1,40 | 466,8 | 663,6 | 100 | 0,49 | 2,40 | 1,714 | 1,793 | -4,60 |
| | | | | | 0,34 | 3,00 | 2,143 | 2,067 | 3,55 |

5.2. Weryfikacja zależności opisujących promień powierzchni swobodnej po jedno- i wieloprzepustowym płaszczeniu

Kształt poprzeczny pasma po I fazie płaszczenia drutu okrągłego charakteryzują wielkości: grubość(h₁) i szerokość (b₁) pasma, szerokość styku metalu z walcem (b_{s1}) oraz promień (r₁) powierzchni swobodnej (rys. 23). Promień powierzchni swobodnej pasma po jednoprzepustowym płaszczeniu drutów opisuje zależność (75). Z zależności tej wynika, że promień jest zależny od poszerzenia i gniotu oraz początkowej średnicy drutu. Ponieważ poszerzenie również jest zależne od średnicy walców, to i promień jest od niego zależny (rys. 53).

Względny promień powierzchni swobodnej (r_1/d_0) pasma po jednoprzepustowym płaszczeniu drutu opisuje zależność (76), której obrazem graficznym jest powierzchnia (rys. 54). Dla ustalonego wskaźnika D/d₀ izolinie tej powierzchni przy narastającym gniocie wykazują podwójne ekstremum r_1/d_0 (rys. 55). Maksymalny i minimalny względny promień powierzchni swobodnej pasma zmienia się w bardzo wąskim zakresie ze wzrostem wskaźnika D/d₀ wzdłuż krzywej wykładniczej (rys.56 i 57) dla odpowiednio również wąskiego zakresu gniotu, przy którym to maksimum i minimum występuje. Takiego charakteru zmian względnego promienia, jak również promienia r_1 , nie potwierdzają wyniki eksperymentalne, które wykazały, że promień r_1 maleje w sposób ciągły w zakresie odwrotności współczynnika gniotu $1 \le 1/\gamma_1 \le 2,8$ (rys. 81).

Ze wzrostem gniotu podczas płaszczenia drutu okrągłego w kotlinie walcowniczej na przekroju poprzecznym pasma odkształcany obszar zawarty między walcami stopniowo narasta. Obszar ten, przy płaszczeniu bardzo małymi gniotami, rzędu $0.98 < \gamma_1 < 1$, jest bardzo mały i obejmuje tylko część powierzchni całego przekroju pasma. Stosunek powierzchni (obszaru) nie podlegającej odkształcaniu do całkowitej powierzchni przekroju kołowego jest bliski jedności. Odkształcana objętość metalu na wysokości przemieszczana zostaje w kierunku poprzecznym, zwiększając nierównomiernie szerokość warstw przypowierz-chniowych na grubości [41]. Ze wzrostem odkształcanego plastycznie klina płaskim stemplem [58]. Warstwy metalu bezpośrednio zgniatane walcami przemieszczają przyległe jego części na boki. Nierównomierny rozkład gniotu na grubości pasma [3, 56] powoduje niejednorodne poszerzenie kolejnych warstw, w wyniku czego zwiększa się promień powierzchni swobodnej. Zmniejszanie promienia jest spowodowane charakterem płynięcia metalu. Ze wzrostem gniotu rosną opory płynięcia, które ograniczają przemieszczanie przy-

powierzchniowych warstw metalu w kierunku poprzecznym wskutek wzrostu stref utrudnionego płynięcia [3, 56]. Natomiast strefa środkowa największych odkształceń pasma zwiększa swe poszerzenie. W wyniku takiego jednoczesnego oddziaływania płynięcia metalu następuje zmniejszanie promienia ze wzrostem gniotu.

W celu zbadania poprawności zależności (75) opisującej promień zarysu powierzchni swobodnej pasma po jednoprzepustowym płaszczeniu drutów porównano wyniki obliczeń z wynikami pomiarów, jakie uzyskano podczas płaszczenia drutu ze stali w gat. C4D o początkowej średnicy 4,92 mm między walcami D = 100 mm. Z pasm po płaszczeniu różnym gniotem pobrano odcinki próbek i wykonano zgłady przekroju poprzecznego pasma. Obrazy makro obserwowano na mikroskopie świetlnym Neophot 2 i rejestrowano w formie cyfrowej na komputerze PC. Przy wykorzystaniu programu komputerowego Corel DRAW 8 zmierzono średnicę koła (d_z) opisującego brzeg zaokrąglenia oraz grubość (h_z) przekroju poprzecznego pasma (rys. 80). Grubość (h_{1i}) i szerokość (b_{1i}) rzeczywistą pasma po różnym odkształceniu mierzono z dokładnością do 0,01 mm. Wyniki pomiarów i przeliczeń zestawiono w tablicy 26.

Tablica 26

Wyniki pomiarów wielkości przekroju poprzecznego pasma po jednoprzepustowym płaszczeniu drutu okrągłego ze stali w gatunku C4D

| Numer | Wymiary | przekroju | Współ. | . Średnica Grubość | | Promień p | Promień pasma | |
|--------|----------------------|----------------------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------|
| próbki | poprzeczn | ego pasma | gniotu | koła | próbki | zmierzony | obliczony | względny |
| | h _{li} , mm | b _{li} , mm | γ1 | d _{zi,} mm | h _{zı,} mm | r _{1z,} mm | r ₁ , mm | % |
| 1 | 4,92 | 4,92 | 1,000 | 52,15 | 52,15 | 2,46 | 2,46 | 0,00 |
| 2 | 4,27 | 5,17 | 0,868 | 54,78 | 47,66 | 2,45 | 2,32 | 5,31 |
| 3 | 3,93 | 5,38 | 0,799 | 51,36 | 44,05 | 2,29 | 2,19 | 4,37 |
| 4 | 3,48 | 5,72 | 0,707 | 48,49 | 39,35 | 2,14 | 2,03 | 5,14 |
| 5 | 2,75 | 6,46 | 0,559 | 42,71 | 32,13 | 1,83 | 1,85 | -1,09 |
| 6 | 2,22 | 6,98 | 0,451 | 33,97 | 24,69 | 1,53 | 2,22 | -45,10 |
| 7 | 2,04 | 7,18 | 0,415 | 31,17 | 22,86 | 1,39 | | |
| 8 | 1,76 | 7,50 | 0,358 | 23,20 | 18,95 | 1,08 | | |

Zmierzony promień zarysu powierzchni swobodnej (r_{1z}) każdego i – tego pasma obliczono ze wzoru:

$$r_{1z} = \frac{d_{zi}}{2} \frac{h_{ii}}{h_{zi}}$$
(86)

gdzie: i - numer próbki.



- Rys. 80. Przekrój poprzeczny oraz promień powierzchni swobodnej pasma po jednoprzepustowym płaszczeniu drutu z różną wartością gniotu
- Fig. 80. The lateral section and radius of free surface profile of a band after the process of single pass flattening of the wire with a draft of different value

Wartości zmierzonego i obliczonego wg wzoru (75) promienia powierzchni swobodnej pasma po różnym gniocie oraz błąd względny pomiędzy wartością zmierzoną a obliczoną zestawiono w tablicy 26. Zmierzony promień w zależności od odwrotności współczynnika gniotu opisano funkcją liniową typu:

$$r_{z1} = 3,256 - 0,789 \frac{1}{\gamma_1} \tag{87}$$

Zmiany wartości promienia zmierzonego i obliczonego według wzoru (75) w zależności od odwrotności współczynnika gniotu przedstawiono na rys. 81.



- Rys. 81. Porównanie wartości zmierzonego promienia zarysu powierzchni swobodnej pasma i obliczonego za pomocą wzoru (75) po jednoprzepustowym płaszczeniu drutu d_o = 4,92 mm między walcami D =100 mm. Stal w gat.C4D
- Fig. 81. The comparison of the value of the desired profile radius of a band free surface, calculated according to formula (75) after the single pass flattening of wire of $d_o = 4,92$ mm diameter with rolls of D = 100mm. C4D steel grade

W przedziale odwrotności współczynnika gniotu $1 \le 1/\gamma_1 < 1,85$ istnieje zgodność obliczonego promienia zarysu powierzchni swobodnej według wzoru (75) ze zmierzonym eksperymentalnie (rys. 81), a błąd względny nie przekracza 5% (tabl. 26). Dla $1/\gamma_1 > 1,85$ wartości promienia obliczonego według wzoru (75) rosną, a z pomiarów maleją. Zmniejszanie wartości promienia wynika z charakteru płynięcia metalu między walcami. Opory płynięcia ograniczają przemieszczanie metalu w kierunku poprzecznym wskutek wzrostu stref utrudnionego płynięcia [3, 51]. Jednocześnie na grubości pasma warstwy środkowe metalu o największym odkształceniu poszerzają się bardziej niż warstwy przyległe do walca. Nierównomierność poszerzania warstw na grubości pasma oraz wzrost oporów płynięcia metalu w kierunku poprzecznym do kierunku walcowania [7, 51, 62] powoduje, że promień maleje ze wzrostem gniotu. Zależności (42) i (74) są ważne dla zmiennej $1/\gamma_1 \le 2$. Dla wartości $1/\gamma_1 > 2$ obliczone wartości stosunku b_{s1}/b₁ według wzoru (74) są większe w stosunku do wartości uzyskanych w eksperymencie. Konsekwencją tej niezgodności są większe wartości obliczonego promienia powierzchni swobodnej w stosunku do zmierzonego eksperymentalnie dla $1/\gamma_1 > 2$.

W celu zbadania poprawności zależności (83), opisującej promień zarysu powierzchni swobodnej w procesie wieloprzepustowego płaszczenia drutu okrągłego, porównano wyniki obliczeń z wynikami pomiaru płaszczonego drutu o początkowej średnicy 4,918 mm między walcami o średnicy 100 mm. Płaszczono druty ze stali w gat. C9D według DIN EN 10016-2 o składzie chemicznym: C = 0,07 %, Mn = 0,42 %, Si = 0,10 %, P = 0,024 % i S = 0,020 %. Drut w stanie po wyżarzaniu posiadał następujące własności wytrzymałościowe: $R_e = 251$ MPa i $R_m = 349$ MPa. Na próbkach pobranych z pasm po walcowaniu różnym gniotem wykonano zgłady przekroju poprzecznego. Po i-tym przepuście zasadnicze wymiary przekroju poprzecznego pasma (h_i , b_i i b_{si}), zmierzono na mikroskopie warsztatowym z dokładnością do 0,001 mm. Wyniki pomiarów i przeliczeń zestawiono w tablicy 27. Na podstawie wyników pomiarów kształtu poprzecznego pasma płaszczonego obliczono promień zarysu powierzchni swobodnej wg wzoru:

$$r_{zi} = \frac{h_i^2}{4(b_i - b_{zi})} + \frac{b_i - b_{zi}}{4}$$
(88)

Otrzymane wyniki promienia (r_{zi}) i obliczonego (r_{oi}) według wzoru (83) zestawiono w tablicy 27, zaś charakter przebiegu ich zmian w funkcji odwrotności całkowitego współczynnika gniotu pokazano na rys. 82. Występujący we wzorze (83) całkowity współczynnik poszerzenia obliczono wg wzoru (71). Błąd względny pomiędzy promieniem r_{zi} a obliczonym wg wzoru (83) przedstawiono w tablicy 27.

Tablica 27

Wyniki pomiarów przekroju poprzecznego pasma po wieloprzepustowym płaszczeniu drutu okrągłego ze stali w gatunku C9D

| Numer | Zmierzor | ne wymiary p | asma | Oblicz. całk. współ. | | Promień | mm | Błąd |
|-----------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|-----------------|---------|-----------------|----------|
| przepustu | h _i | b _i | b _{si} | gniotu | poszerz. | ľ zi | r _{oi} | względny |
| n | mm | mm | mm | Yci | β _{ci} | | | % |
| 0 | $d_{o} = 4,$ | 918 mm | | 1,000 | 1,000 | 2,459 | 2,459 | 0,00 |
| 1 | 3,849 | 5,240 | 2,913 | 0,783 | 1,065 | 2,173 | 2,108 | 3,02 |
| 2 | 2,891 | 5,933 | 4,411 | 0,588 | 1,206 | 1,753 | 1,661 | 5,29 |
| 3 | 2,194 | 6,457 | 5,344 | 0,446 | 1,313 | 1,359 | 1,295 | 4,72 |
| 4 | 1,646 | 6,853 | 6,013 | 0,335 | 1,393 | 1,016 | 0,990 | 2,62 |
| 5 | 1,328 | 7,101 | 6,435 | 0,270 | 1,444 | 0,829 | 0,806 | 2,68 |
| 6 | 0,870 | 7,494 | 7,072 | 0,177 | 1,524 | 0,554 | 0,534 | 3,54 |

W zakresie gniotu mniejszego od 82,3% istnieje zgodność pomiędzy wartością promienia zmierzonego a obliczoną według wzoru (83).

Błąd względny pomiędzy promieniem zmierzonym a obliczonym wynosi 2,62 do 5,29%.



- Rys. 82. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów promienia zarysu powierzchni swobodnej pasma po wieloprzepustowym płaszczeniu drutu o średnicy 4,918 mm między walcami o średnicy 100 mm. Stał w gat.C9D
- Fig.82. The comparison of calculation results to measurements of profile radius of a band free surface after the process of multi pass flattening of wire of 4.918mm diameter with rolls of 100mm diameter. C9D steel grade

5.3. Porównanie wielkości poszerzenia i promienia obliczonych różnymi metodami

Dla ustalonych parametrów procesu wieloprzepustowego płaszczenia drutu porównano eksperymentalne wartości współczynnika poszerzenia z wynikami obliczonymi według wzoru (71) oraz uzyskanymi w symulacji MES. Dodatkowo, do porównania poszerzenia przyjęto zależności (4) Webera i (10) Zlotnikova, według których obliczone wartości poszerzenia zbliżone są do wartości eksperymentalnych [23].

Wyniki badań poszerzenia otrzymane podczas wieloprzepustowego płaszczenia na zimno, bez smarowania, drutu o średnicy $d_0 = 3,93$ mm ze stali w gat. C4D między walcami o średnicy D = 100 mm przedstawiono w tablicy 28. W badaniach promień powierzchni swobodnej pasma wyznaczono w sposób analogiczny jak w pkt 5.2. niniejszej pracy, a wyniki zestawiono w tablicy 28.

Tablica 28

Współczynniki odkształcenia i wymiary zarysu przekroju poprzecznego pasma podczas

| * * | | | CAD |
|---------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
| Wielonrzenlictowego | nlaczezonia dmiti | TA CTOLI W/ GOT | 1 211 |
| WICIODIZCDUSIOWCEO | Diaszezenia urutu | LU Stall W gat. | $\mathbf{U} \mathbf{T} \mathbf{U}$ |
| | | 0 | - |

| Nr | Wymiary | przekroju po | przecznego | Współczynniki odkształcenia | | | |
|-----------|---------|----------------|-----------------|-----------------------------|-------|-------|-----------------|
| przepustu | hi | b _i | b _{si} | г | Ϋ́i | Yei | β _{ci} |
| | mm | mm | mm | mm | | | |
| 0 | 3,93 | 3,93 | 0 | 1,965 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 3,13 | 4,26 | 2,286 | 1,734 | 0,796 | 0,796 | 1,084 |
| 2 | 2,35 | 4,76 | 3,516 | 1,421 | 0,751 | 0,598 | 1,211 |
| 3 | 1,81 | 5,24 | 4,325 | 1,124 | 0,770 | 0,461 | 1,333 |
| 4 | 1,45 | 5,58 | 4,849 | 0,902 | 0,801 | 0,369 | 1,420 |
| 5 | 1,15 | 5,89 | 5,331 | 0,731 | 0,793 | 0,293 | 1,499 |

Porównanie wartości całkowitego współczynnika poszerzenia, obliczonego według różnych metod, w zależności od całkowitego współczynnika gniotu przedstawiono w tablicy 29, zaś charakter zmian tych wielkości na rys. 83.

Tablica 29

Porównanie całkowitego współczynnika poszerzenia obliczonego według różnych metod podczas wieloprzepustowego płaszczenia drutu o średnicy $d_0 = 3,91$ mm ze stali w gat. C4D

| Nr | Współcz | ynniki | Obl. | współ. pos | zerzenia mete | odą | Błąd względny | | | |
|-----------|---------|-----------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------|---------------|------|-----------------|
| przepustu | odkszta | Icenia | autora | Webera | Zlotnikova | MES | % | | | |
| | Yei | β _{ci} | β _{coi} 1) | β _{coi} ²⁾ | β _{coi} ³⁾ | β _{coi} 4) | Δ ¹⁾ | $\Delta^{2)}$ | Δ 3) | Δ ⁴⁾ |
| 0 | | - | | | | | | | | |
| 1 | 0,796 | 1,084 | 1,122 | 1,075 | 1,039 | 1,062 | -3,50 | 0,82 | 4,17 | 1,99 |
| 2 | 0,598 | 1,211 | 1,232 | 1,180 | 1,162 | 1,171 | -1,73 | 2,56 | 4,09 | 3,33 |
| 3 | 0,461 | 1,333 | 1,335 | 1,285 | 1,274 | 1,274 | -0,12 | 3,65 | 4,46 | 4,48 |
| 4 | 0,369 | 1,420 | 1,427 | 1,381 | 1,365 | 1,358 | -0,48 | 2,75 | 3,87 | 4,35 |
| 5 | 0,293 | 1,499 | 1,517 | 1,484 | 1,454 | 1,436 | -1,20 | 0,96 | 2,99 | 4,16 |

Za miarę zgodności wyników pomiędzy zmierzonym współczynnikiem poszerzenia (β_{ci}) a obliczonym (β_{coi}) przyjęto względny błąd procentowy (Δ^{j}) . W całym zakresie analizowanych wartości $1/\gamma_c$ charakter zmian obliczonego współczynnika poszerzenia różnymi metodami jest zgodny z wynikami eksperymentu (rys. 83). Istnieje zgodność pomiędzy zmierzoną wartością całkowitego współczynnika poszerzenia a obliczoną według analizowanych wzorów oraz MES, przy czym błąd względny nie przekraczał wartości 4,5% (tabl. 29).

Przedstawione na rys. 83. zmiany współczynnika poszerzenia, obliczone różnymi metodami, w zależności od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu, są zgodne z wynikami eksperymentu, a wyznaczone w komputerowej symulacji są mniejsze od wartości eksperymentalnych (rys. 83). Odwrotnie, obliczone współczynniki poszerzenia według wzoru (71) autora są wyższe od uzyskanych w eksperymencie, przy czym są one bliższe rzeczywistym. Współczynniki poszerzenia obliczone za pomocą wzorów (4) Webera i (10) Zlotnikova są obarczone nieco większym błędem niż uzyskane według wzoru (71).



Rys. 83. Porównanie wartości całkowitego współczynnika poszerzenia, obliczonego wg różnych metod, podczas wieloprzepustowego płaszczenia drutu o średnicy d_o = 3,93 mm ze stali w gat. C4D między walcami D = 100 mm

Fig. 83. The comparison of total widening coefficient calculated by different methods during the process of multi pass flattening of C4D steel wire of $d_0 = 3.93$ mm diameter with rolls of D = 100 mm diameter

Porównanie zmierzonego promienia powierzchni swobodnej pasma z obliczonym według wzoru (83) autora oraz z wyznaczonym w symulacji MES przedstawiono w tablicy 30, zaś zależność zmiany promienia od odwrotności całkowitego gniotu na rys. 84. W całym zakresie analizowanych gniotów ε_h < 70% wartości promienia obliczone wg wzoru (83) i w symulacji MES są bardzo bliskie sobie, jednakże są nieco mniejsze w stosunku do zmierzonych (rys. 83). Procentowy błąd względny pomiędzy zmierzoną wartością promienia a obliczoną według wzoru (83) jest mniejszy od 5%, a pomiędzy wartościami z symulacji MES nie przekracza 6,3% (tabl.30).

Tablica 30

Zmierzony i obliczony promień powierzchni swobodnej pasma po wieloprzepustowym płaszczeniu drutu o średnicy d = 3,93 mm między walcami D = 100 mm. Stal w gat.C4D

| Nr | Współ. od | lkształ. | Pror | nień powierza | Błąd w | /zględny | |
|-----------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|--------------------------------|--------------------|
| przepustu | Yci | β _{ci} | swot | odnej pasma, | sma, mm % | | |
| | | | r _{iž} | wz.(83) I io | r i MES | Δ _i ^{z-ob} | Δ_i^{z-MES} |
| 0 | 1 | 1 | 1,965 | 1,965 | 1,955 | | |
| 1 | 0,796 | 1,084 | 1,734 | 1,702 | 1,702 | 1,86 | 1,86 |
| 2 | 0,598 | 1,211 | 1,421 | 1,349 | 1,350 | 5,07 | 4,98 |
| 3 | 0,461 | 1,333 | 1,124 | 1,069 | 1,053 | 4,91 | 6,30 |
| 4 | 0,369 | 1,420 | 0,902 | 0,869 | 0,855 | 3,61 | 5,19 |
| 5 | 0,293 | 1,499 | 0,731 | 0,697 | 0,700 | 4,68 | 4,27 |



- Rys. 84. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów promienia zarysu powierzchni swobodnej pasma w wieloprzepustowym płaszczeniu drutu o średnicy d_o = 3,93 mm między walcami D = 100 mm. Stal w gat. C4D
- Fig. 84. The comparison of calculation results to measurements of free surface profile of a band during the process of multi pass flattening of wire of $d_0 = 3.93$ mm diameter with rolls of 100mm diameter. C9D steel grade

5.4. Algorytm doboru parametrów początkowych drutu dla żądanych wymiarów taśmy

W pierwszym przepuście (i = 1) procesu płaszczenia drutu okrągłego o średnicy początkowej d_o uzyskuje się pasmo o grubości i szerokości odpowiednio (h₁ x b₁). W kolejnych przepustach i = 2, 3 ..., n płaszczenia pasma płaskiego uzyskiwano wymiary (h_i x b_i). W i-tym przepuście zależą one od średnicy początkowej płaszczonego drutu d_o, jego własności wytrzymałościowych R_{*}^{*} , R_{m} , średnicy walców D oraz współczynnika gniotu γ_{1} , γ_{2} ,..., γ_{i} w poszczególnych przepustach. Wymiary pasma (h_i x b_i) po i - tym przepuście zależne od parametrów procesu płaszczenia i parametrów drutu ;

$$D, d_o, R_o^* / R_m, \gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_i$$
(89)

określono za pomocą następujących wzorów rekurencyjnych:

$$\begin{array}{l} h_{1} = d_{o}\gamma_{1}, \\ b_{1} = d_{o}\beta_{1} \\ \beta_{1} = 1 - H_{j}\ln(1/\gamma_{1}) \\ H_{j} = 0,241\ln(D/d_{o}) - 0,182(R_{e}^{*}/R_{m}) - 0,141 \\ \gamma_{c1} = \gamma_{1} \end{array} \right\}$$
(90)

i = 2,3,...,n

i = 1

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_{i} &= \mathbf{h}_{i-1} \gamma_{i} \\ \mathbf{b}_{i} &= \mathbf{d}_{o} \beta_{ci} \\ \beta_{ci} &= \beta_{1} + \mathbf{H}_{pi} \ln(\gamma_{1} / \gamma_{ci}) \\ \mathbf{H}_{pi} &= 0.248 \ln(\mathbf{D} / \mathbf{h}_{1}) - 0.213 \varepsilon_{hi} - 0.207 (\mathbf{R}_{e}^{*} / \mathbf{R}_{m}) - 0.268 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{hi} &= 1 - \gamma_{i} \\ \gamma_{ci} &= \gamma_{ci-1} \cdot \gamma_{i} \end{aligned}$$

$$\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (91)$$

Ze względów technologicznych ograniczono dopuszczalne wartości gniotów w przepustach:

$$0,2 \le \varepsilon_{h1} \le 0,4$$
 dla $i = 1$
 $0,15 \le \varepsilon_{hi} \le 0,35$ dla $i = 2,3,...$ (92)

które są potwierdzone w praktyce walcowniczej.

Dla żądanych wymiarów taśmy (h x b) oraz dobranej liczby przepustów n, średnicy walców D i własności wytrzymałościowych drutu (R_e^*/R_m) można określić wartości współczynników gniotu (γ_i) w przepustach oraz średnicę drutu d_o:

 $d_o, \gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_i$

(93)

rozwiązując układ równań w postaci:

$$\begin{array}{c} \mathbf{h}_{i} \left(\mathbf{d}_{o}, \gamma_{1}, \gamma_{2}, ..., \gamma_{i} \right) = \mathbf{h} \\ \mathbf{b}_{i} \left(\mathbf{d}_{o}, \gamma_{1}, \gamma_{2}, ..., \gamma_{i} \right) = \mathbf{b} \end{array}$$

$$(94)$$

gdzie: h_i, b_i - funkcje wielu zmiennych określające wymiary taśmy po i-tym przepuście (90) i (91).

Dla danej liczby przepustów "i" układ równań (94) nie zawsze posiada rozwiązanie i dlatego zastapiono go zagadnieniem optymalizacji nieliniowej:

$$\min_{\mathbf{h}_{i}, \mathbf{v}_{i}, \mathbf{v}_{m}, \mathbf{v}_{i}} \left[(\mathbf{h}_{i} - \mathbf{h})^{2} + (\mathbf{b}_{i} - \mathbf{b})^{2} \right] \Big|_{\mathbf{D}, \mathbf{R}_{e} / \mathbf{R}_{m}}$$
(95)

z ograniczeniami nierównościowymi (92) oraz dodatkową:

$$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i > 0 \tag{96}$$

Można założyć, że rozwiązanie $(d_0^*, \gamma_1^*, \gamma_2^*, ..., \gamma_1^*)$ zagadnienia optymalizacji (95) z ograniczeniami (92) i (96) spełnia warunki technologiczne procesu, jeśli dla przyjętych tolerancji wymiarów pasma (T_h, T_b) spełnione są warunki:

$$\begin{vmatrix} \mathbf{h}_{i}(\mathbf{d}_{0}^{*}, \boldsymbol{\gamma}_{1}^{*}, \boldsymbol{\gamma}_{2}^{*}, ..., \boldsymbol{\gamma}_{1}^{*}) - \mathbf{h} \end{vmatrix} \leq \mathbf{T}_{h} \\ \begin{vmatrix} \mathbf{b}_{i}(\mathbf{d}_{0}^{*}, \boldsymbol{\gamma}_{1}^{*}, \boldsymbol{\gamma}_{2}^{*}, ..., \boldsymbol{\gamma}_{1}^{*}) - \mathbf{h} \end{vmatrix} \leq \mathbf{T}_{h} \end{aligned}$$
(97)

Rozwiązując kolejno zagadnienie optymalizacji (95) dla i = 1,2,..., n można wyznaczyć minimalną liczbę przepustów, dla której spełnione są warunki (96) i (97). Zagadnienie optymalizacji (95) z ograniczeniami (92), (96) i (97) rozwiązano metodą gradientów sprzężonych [9], korzystając z gotowego algorytmu zawartego w opcji Solver arkusza kalkulacyjnego Excel [68].

Na rys. 85. przedstawiono fragment arkusza kalkulacyjnego z wynikami obliczeń dla następujących danych:

- średnica walców D = 200 (kolumna B),

- własności materiału drutu $R_e^*/R_m = 0.8$ (kolumna B),

- liczba przepustów n = 4 (kolumna B).

Dla wstępnie dobranych parametrów procesu płaszczenia drutu:

- średnica drutu $d_o = 2,1$ (kolumna I, wiersz 15),

- współczynniki gniotu w przepuście (wiersz 16) $\gamma_1 = 0,60, \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 0,65$, otrzymuje się:

 $h(d_o, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)|_{D, Re'Rm} = 0.35$, $b(d_o, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)|_{D, Re'Rm} = 5.00$ (kol.C, wiersze 6 i 7) oraz wartość funkcji celu (95) równą 0.002088 (kolumna F, wiersz 8) dla zadanych wymiarów taśmy h x b = 0.3 x 5 mm (kolumna B, wiersze 6 i 7).

| | A | B | ç | D | E | F | GT | H | 1 | - | - |
|----|------------------------|-------|-------|------------|------------|----------|---|-------|----------|------|------|
| - | - | | | Num | ner przepu | stu | | 11 | 1 | | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | - 10 B S | Into | 5 |
| 3 | - | | | | | 1 | | | | _ | |
| 4 | D, mm | 200 | | | | | | | | | |
| 10 | | 4 | | Tolerancia | | | | | | | |
| 7 | h mm | 0.30 | 0.35 | 0.02 | 111 | 2.07E-03 | | | | | |
| B | IS mm2 | 3.00 | 5.00 | 0.04 | OK | 1.50E-05 | | | 1 | | |
| 9 | a, mm | 1.50 | | | OK | B.002088 | | | | | |
| 10 | R., MPa | 800 | | | | | | | - | | |
| 11 | R _m , MPa | 1000 | | | | | | | | | |
| 12 | Ben | | 2.363 | | | | 100010000000000000000000000000000000000 | | | | |
| 13 | Yon | 0.10 | 0.165 | | OK I | | | | | | |
| 14 | r _n , mm | | 0.21 | | | | | | | | 10.1 |
| 15 | 1 | | | | 1 | | | | de mm | 10 | |
| 16 | m | 0.60 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.70 | 0 70 | 0.76 | 2.4 | 00,0 | m n |
| 17 | Yoi | 0.600 | 0.390 | 0.254 | 0.165 | 0 115 | 0.081 | 0.73 | Z. 1 | | 3.45 |
| 18 | | 1. | | | | 0.710 | 0.001 | 0.001 | | | |
| 19 | A - górne | 0.4 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.3 | 0.25 | | | |
| 20 | a _h - doine | D.2 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.2 | 0.15 | 0.15 | | | |
| 21 | 8hi | 0.40 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0 30 | 0.30 | 0.25 | | | |
| 22 | H ₁ | 0.812 | | | | | 0.00 | 0.23 | | | |
| 23 | H | 0.812 | 0.749 | 0.749 | 0.749 | 0.760 | 0.760 | 0.770 | | | |
| 24 | β1 | 1.415 | | | | 0.700 | 0,00 | 0.770 | | | |
| 25 | Bel | 1.415 | 1.737 | 2.060 | 2.383 | 2.667 | 2,938 | 3 181 | | | |
| 26 | | | | | | | | 0.101 | | | |
| 27 | h _i mm | 1.26 | 0.82 | 0.53 | 0.35 | 0.24 | 0.17 | 0.13 | | | |
| 28 | b _i , mm | 2.97 | 3.64 | 4.32 | 5.00 | 5 59 | 6 16 | 6.67 | | | |
| 29 | n, mm | 0.73 | 0.49 | 0.33 | 0.21 | 0.15 | 0.11 | 0.07 | | | |

Rys. 85. Przykład arkusza kalkulacyjnego wyników obliczeń parametrów procesu płaszczenia dla zadanych wymiarów taśmy 0,3 x 5,0 mm oraz n = 4 i D = 200 mm

Fig. 85. The example of spread sheet with calculation results of flattening process parameters for the assigned strip dimensions of 0.3×5.0 mm and n = 4, D = 200mm

Rozwiązanie przy pomocy programu Solvera zagadnienia optymalizacji (95) z ograniczeniami (92), (96) i (97) dla n = 4 przedstawiono na rys. 85. W wyniku rozwiązania uzyskano średnicę drutu i wartości współczynnika gniotu w przepustach odpowiednio:

$$d_{0}^{*} = 2,10 \text{ mm}, \quad \gamma_{1}^{*} = 0,60, \quad \gamma_{2}^{*} = 0,65, \quad \gamma_{3}^{*} = 0,65 \text{ i } \quad \gamma_{4}^{*} = 0,65$$

dla których wymiary taśmy wynoszą: $(h^* \times b^*) = (0,35 \times 5,00 \text{ mm})$, a wartość funkcji celu (95) jest równa 0,002088. Uzyskane rozwiązanie nie spełnia jednak wymagań wynikających z przyjętej tolerancji $(T_h, T_b) = (0,02;0,04)$. Wobec braku poprawnego rozwiązania przy liczbie przepustów n = 4 zwiększono średnicę walców z D = 200 mm na D = 250 mm. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 86.

| - 25-1 | A | ER. | C | D | E | F | G | H | See. Lat | J |
|--------|----------------------|-------------|-------|-----------|-----------|----------|-------|-------|-------------------|----------------|
| 1 | | | | Numer p | rzepustu | 1.201 | | 1 | in | fo |
| 2 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | philade parts | and the second |
| | Dmm | 251 | | | | | | | | |
| 5 | n l | 4 | T | olerancia | | | | | | - |
| 6 | h.mm | 0.30 | 0.33 | 0.02 | <u>H1</u> | 8.39E-04 | | | | |
| 7 | b, mm | 5.00 | 5.00 | 0.04 | OK | 5.37E-06 | | | | |
| 8 | S, mm ² | 1.50 | | | OK | 0.00084 | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | |
| 10 | R. MPa | 800 | _ | | | - | | | | |
| 11 | R _m , MPa | 1000 | | | | | | | | |
| 12 | Ben | Sec. M. Mar | 2.503 | | | | | | | |
| 13 | Yen | 0.10 | 0.165 | | OK | | | | | |
| 14 | r _a mm | | 0.20 | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | d _a mm | Sc.mm |
| 16 | γ. | 0.60 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.70 | 0.70 | 0.75 | 2.00 | 3.13 |
| 17 | Yci | 0.600 | 0.390 | 0.254 | 0.165 | 0.115 | 0.081 | 0.061 | | |
| 18 | | | - | | | | | | _ | |
| 19 | e, - górne | 0.4 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.3 | 0.25 | | |
| 20 | z,- doine | 0.2 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.2 | 0.15 | 0.15 | | |
| 21 | Eni | 0.40 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.30 | 0.30 | 0.25 | | |
| 22 | H ₁ | 0.877 | | | | | | | | |
| 23 | H | 0.877 | 0.816 | 0.816 | 0.816 | 0.827 | 0.827 | 0.838 | | |
| 24 | β, | 1.448 | Ť | | | | | | | |
| 25 | ßei | 1.448 | 1.800 | 2.152 | 2.503 | 2.812 | 3.107 | 3.369 | | |
| 26 | | 1 | 1 | | | | | | | |
| 27 | h, mm | 1.20 | 0.78 | 0.51 | 0.33 | 0.23 | 0.16 | 0.12 | | |
| 28 | b, mm | 2.89 | 3.59 | 4.30 | 5.00 | 5.61 | 6.20 | 6.73 | - | |
| 28 | ri, mm | 0.70 | 0.47 | 0.31 | 0.20 | 0.14 | 0.10 | 0.08 | | |

Rys. 86. Przykład arkusza kalkulacyjnego wyników obliczeń parametrów procesu płaszczenia dla zadanych wymiarów taśmy 0,3 x 5,0 mm oraz n = 4 i D = 250 mm

Fig. 86. The example of spread sheet with calculation results of flattening process parameters for the assigned strip dimensions of 0.3 x 5.0mm and n = 4, D = 250 mm

Wynika z niego, że dla D = 250 mm uzyskano wymaganą szerokość b = 5,0 mm, natomiast grubość taśmy h = 0,33 nie mieści się w zadanej tolerancji, mimo iż funkcja celu jest bliska wartości zero (0,00084).

Dla uzyskania zadanych wymiarów taśmy podjęto próbę zwiększenia liczby przepustów. Dla n = 5 przepustów uzyskano zadane wymiary taśmy h x b = 0,30 x 5,0 mm, a wartość funkcji celu jest równa 2,15x10⁻¹¹. Wynik rozwiązania, zamieszczony na rys. 87, spełnia wymagania stawianemu zagadnieniu optymalizacji doboru parametrów początkowych drutu do płaszczenia dla żądanych wymiarów taśmy.

| A | B | C | D | 5 3 | F | 0 | H | 1 1 | 1 1 |
|--------------------|-------|-------|-------------|---------|--------------|-----------------------|-------|------|-------|
| 1 | | | Numer pr | zepustu | 111. 1-1-1.4 | and the second second | | I Is | 10 |
| 2 i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | |
| 3 | | | | | | 1 | | | |
| D, mm | 250 | | | | | | | 1 | |
| G h mm | 0.20 | 105.0 | l olerancja | 014 | | | _ | | |
| 3 h mm | 5.00 | 5.00 | 0.02 | OK | 1.95E-12 | | | | |
| 8 S mm | 1.50 | 3.001 | 0.04 | OK | 3446525 44 | | | | |
| 9 | 1.50 | | | | Z.14033E-11 | | | | |
| 10 R. MPa | 800 | | | 1 | | - | | | |
| 11 R., MPa | 1000 | | | | | - | | | |
| 12 P.S. | | 2.607 | | | | | | | 1000 |
| 13 Yes | 0.10 | 0.156 | | OK | | | | | |
| 14 r., mm | 1 | 0.19 | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | d mm | So -2 |
| 16 7. | 0.60 | 0.69 | 0.69 | 0.69 | 0.80 | 0.70 | 0.75 | 1.92 | 2.89 |
| 1.7 Yei | 0.600 | 0.413 | 0.284 | 0.196 | 0.156 | 0.109 | 0.082 | | 1 |
| 18 | - | | | | | | | | |
| 19 En - gome | 0.4 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.3 | 0.25 | | _ |
| 20 z,- doine | 0.2 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.2 | 0.15 | 0.15 | | |
| 21 a _{h1} | 0.40 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.20 | 0.30 | 0.25 | | |
| 22 H1 | 0.887 | | | | 1 | 1 | | | |
| 23 H | 0.887 | 0.834 | 0.834 | 0.834 | 0.858 | 0.837 | 0.848 | | A |
| 24 Bi | 1.453 | | | | | 0.001 | 0.040 | | |
| 25 β _{cl} | 1.453 | 1.765 | 2.077 | 2.389 | 2.607 | 2.877 | 3.139 | 1000 | |
| 28 | | | | | | | | | |
| 27 himm | 1.15 | 0.79 | 0.54 | 0.37 | 0.30 | 0.21 | 0.16 | | |
| 28 b, mm | 2.79 | 3.39 | 3.98 | 4.58 | 5.00 | 5.52 | 6.02 | | |
| 29 rl, mm | 0.67 | 0.48 | 0.33 | 0.23 | 0.19 | 0.13 | 0.10 | - | |

Rys. 87. Przykład arkusza kalkulacyjnego wyników obliczeń parametrów procesu płaszczenia dla zadanych wymiarów taśmy 0,3 x 5,0 mm oraz n = 5 i D = 250 mm

Fig. 87. The example of spread sheet with calculation results of flattening process parameters for the assigned strip dimensions of 0.3×0.5 mm and n = 5, D = 250 mm

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Badania płynięcia metalu w procesie płaszczenia na zimno drutów o przekroju kołowym na wąskie taśmy prowadzono w wielu zespołach badawczych krajowych i zagranicznych. Głównym przedmiotem tych badań była analiza wpływu parametrów procesu na poszerzenie pasma oraz zmianę zarysu jego kształtu poprzecznego. Wynikiem tych prac są wzory i nomogramy do obliczenia początkowej średnicy drutu do płaszczenia [5, 10, 39, 42, 50, 53, 54, 61], zależności opisujące poszerzenia pasma [1, 14, 17, 19, 20, 23, 25, 29, 54, 57, 62, 65] oraz związki przewidujące zmianę promienia powierzchni swobodnej pasma po płaszczeniu [36, 52, 54, 62, 65]. Wyznaczone zależności stanowiły podstawę projektowania procesu technologicznego płaszczenia taśm o zadanych wymiarach.

W dotychczasowych zależnościach empirycznych do obliczania poszerzenia podstawowymi parametrami, mającymi wpływ na jego wartość, są: początkowa średnica drutu (d_o), średnica walców (D) lub alternatywnie wskaźnik D/ d_o , całkowity gniot względny (ϵ_{hc}) oraz wartość naprężeń pochodzących od naciągu i przeciwciągu.

Zależności opisujące poszerzenie w funkcji parametrów procesu płaszczenia (6 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16 i 17), jak również wzory (1, 2, 3, 4, 5) umożliwiające dobór początkowej średnicy drutu do płaszczenia nie uwzględniają odmiennego charakteru odkształcania pasma, jaki występuje w kotlinie odkształcenia podczas walcowania drutu w kolejnych przepustach. Występujące zróżnicowanie odkształcania pasma wynika z rozkładu gniotu na szerokości:

- nierównomiernego w pierwszym przepuście,

- równomiernego w kolejnych przepustach.

W związku z tak przyjętym podziałem odkształcania ww. zależności nie ujmują zasadniczych parametrów płaszczenia oraz z tym związanej zmiany kształtu pasma. Ponadto, w zależnościach opisujących poszerzenie pasma brak jest ujęcia własności wytrzymałościowych płaszczonych drutów.

Zależności opisujące zmianę promienia powierzchni swobodnej pasma od gniotu (tabl.3, pkt.2.1.) [36, 52, 54, 62, 65], podobnie jak w przypadku zależności na poszerzenie, nie uwzględniają odmiennego przebiegu odkształcania pasma, jakiego doznaje ono podczas płaszczenia. Znajomość zarysu kształtu poprzecznego pasma po płaszczeniu jedno- i wieloprzepustowym jest bardzo ważna z dwóch powodów. Po pierwsze, ze względu na możliwość dokładnego wyznaczenia powierzchni przekroju poprzecznego, a tym samym wydłużenia pasma w przepuście, i po drugie, z potrzeby uzyskania wyrobu finalnego o określonym kształcie poprzecznym.

Powyższe zagadnienia zgodnie ze sformułowaną tezą pracy postanowiono rozwiązać przy wykorzystaniu opracowanych funkcji opisujących odkształcanie pasma o przekroju kołowym w jedno- i wieloprzepustowym walcowaniu.

Materiał do badań stanowiły druty ze stali węglowej o zróżnicowanej zawartości węgla, w stanie obrobionym cieplnie, a więc o różnych własnościach mechanicznych.

Wieloprzepustowe płaszczenie drutu o przekroju kołowym na taśmy rozpatrywano jako proces składający się z fazy nierównomiernego gniotu na szerokości w pierwszym przepuście i fazy równomiernego gniotu w kolejnych przepustach. W oparciu o tak przyjęty schemat przebiegu odkształcania opracowano funkcje opisujące poszerzenie (26) i promień powierzchni swobodnej pasma (31) i (38) odpowiednio dla jedno- i wieloprzepustowego płaszczenia.

Występujące w funkcjach opisujących poszerzenie współczynniki H_j i H_p , odnoszące się do I i II fazy odkształcania pasma zależne od parametrów płaszczenia i własności wytrzymałościowych drutów oraz występujące w funkcjach opisujących promień powierzchni swobodnej pasma po przepuście stosunki szerokości b_{s1}/b_1 i b_{si}/b_i zależne od wielkości odkształcenia, wyznaczono na podstawie badań eksperymentalnych, których wyniki opracowano przy wykorzystaniu metod analizy statystycznej [13, 38].

Algorytm doboru parametrów procesu wieloprzepustowego płaszczenia dla żądanych wymiarów taśmy pozwala na określenie współczynników gniotu oraz początkowej średnicy drutu dla ustalonej liczby przepustów, średnicy walców oraz własności wytrzymałościowych materiału drutu. Umożliwia więc określenie minimalnej liczby przepustów dla zadanych wymiarów taśmy.

Wyniki uzyskane z przeprowadzonej weryfikacji przyjętych własnych funkcji opisujących poszerzenie i zarysu kształtu poprzecznego pasma w pełni potwierdzają założoną tezę pracy. Rezultatem przeprowadzonych badań są następujące wnioski:

 W procesie wieloprzepustowego płaszczenia drutu na wąskie taśmy odrębnie należy rozpatrywać fazę odkształcania podczas walcowania drutu o przekroju kołowym w płaski i fazę dalszego odkształcania pasma otrzymanego z drutu po wstępnym jego spłaszczeniu. 2. W procesie płaszczenia drutu poprawny przebieg poszerzenia dla fazy I, w której płaszczenie odbywa się z nierównomiernym gniotem na szerokości, opisuje zależność:

$$\beta = 1 + H_j \ln \frac{1}{\gamma}$$

w której współczynnik H_j jest zależny od wskaźnika D/d_o i zapasu plastyczności materiału drutu wyrażonego stosunkiem R_e^*/R_m (67), a dla fazy II, w której płaszczenie pasma płaskiego odbywa się równomiernym gniotem na szerokości, wyraża zależność:

$$\beta_{cp} = 1 + H_p \ln \frac{1}{\gamma_{cp}}$$

w której współczynnik H_p jest zależny od wskaźnika D/h₁, gniotu względnego w przepuście ε_h i zapasu plastyczności materiału drutu R_e^{*}/R_m (70). Korzystając z zasady superpozycji całkowite poszerzenie dla obu faz można opisać

funkcją:

| 0 | $1 + H_{j} \ln \frac{1}{\gamma}$ | dla | $1 \le \frac{1}{\gamma} \le 2$ |
|-------|---|-----|--|
| β = · | $\beta_1 + H_p \ln \frac{\gamma_1}{\gamma_c}$ | dla | $\frac{1}{\gamma_1} < \frac{1}{\gamma} \le \frac{1}{\gamma_c}$ |

przy czym jej szczegółową postać wyraża wzór (71).

- 3. Porównanie obliczonych różnymi metodami wielkości poszerzenia i promienia powierzchni swobodnej pasma z wynikami eksperymentu oraz dokonana weryfikacja funkcji (71) dla innych stali w pełni potwierdza słuszność przyjętego podziału przebiegu odkształcania na dwie zasadnicze fazy, a zaproponowany wzór (71) prawidłowo opisuje poszerzenie w procesie jedno- i wieloprzepustowego płaszczenia drutów ze stali węglowych. W przypadku stali wysokostopowych zgodność ta występuje dla gniotu $\varepsilon_{hc} >$ 0,45.
- Weryfikacja zależności (75) na promień powierzchni swobodnej pasma po płaszczeniu jednoprzepustowym i zależności (83) po wieloprzepustowym w pełni potwierdziła ich zgodność opisu odpowiednio w zakresie wartości współczynnika gniotu 0,5 < γ ≤ 1 oraz 0,15 < γ_c ≤ 1. Potwierdzona została również zgodność tych zależności z opracowanymi opisami zarysu kształtu poprzecznego pasma i odkształcania.
- 5. Symulacja procesu wieloprzepustowego płaszczenia drutów na zimno metodą elementów skończonych dla trójosiowego stanu odkształcenia pozwoliła na wyznaczenie podstawowych charakterystyk rozkładu składowych naprężeń i prędkości płynięcia metalu w

kotlinie walcowania dla I i II fazy odkształcania pasma oraz intensywności odkształceń i wymiarów pasma w poszczególnych przepustach.

- 6 Analiza wyników obliczeń numerycznych wykazała, iż uzyskany w komputerowej symulacji charakter płynięcia metalu w procesie wieloprzepustowego płaszczenia drutów, w tym charakter zmian poszerzenia i promienia powierzchni swobodnej w zależności od gniotu jest zgodny z wynikami obliczonymi na podstawie opracowanych własnych funkcji oraz danymi eksperymentalnymi.
- 7 Zbudowany na podstawie zależności (71) opisującej poszerzenie algorytm doboru parametrów początkowych drutu ze stali węglowych do płaszczenia dla zadanych wymiarów taśmy pozwala, przy ustalonej średnicy walców, minimalizować liczbę przepustów dla przyjętych wartości pojedynczych gniotów względnych.

Reasumując, wyniki uzyskane w pracy pozwalają na racjonalny dobór początkowych parametrów drutu ze stali węglowych do płaszczenia, prawidłowe projektowanie technologii procesu oraz dają podstawę do ich wykorzystania przy opracowaniu programu komputerowego wspomagania projektowania i sterowania procesem płaszczenia taśm na zimno podczas jedno- i wieloprzepustowego walcowania drutów.

LITERATURA

- 1. Bričko G.A: K razčetu raznotolščinnosti i raznoširinnosti pljuščenoj lenty. Metiznoje Proizvodstvo, 1972, nr 1, s. 102.
- 2. Carlsson B.: The contact pressure distribution in flat rolling of wire. Journal of Materials Processing Technology 73, 1998, s. 1.
- 3. Celikov A. I., Griškov A. I.: Teorija prokatki, Metallurgia, Moskva 1970.
- 4. Čus A.V., Klimenko P.L., Ibragimov M.M.: Isslledovanie processa deformacii metalla pri prokatke polos iz prutkov. Metallurgija i Koksochimija, 1985, nr 86, s.33.
- 5. Davies C.E.: Spead of Metall Rolling. The Engineer. June 1926.
- 6. Dyja H.: Symetryczny i asymetryczny proces walcowania dwuwarstwowych wyrobów płaskich. Politechnika Częstochowska, Seria monografie nr 12, Częstochowa 1990.
- 7. Dyja H. Wilk K.: Asymetryczne walcowanie blach i taśm. Seria Metalurgia nr 2, Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1998.
- 8. Figwer W., Mościski J., Ogonowski Z.: Laboratorium metod optymalizacji statycznej, Pol. Śląska, Skrypt uczelniany nr 2114, Wyd. Pol. Śląska, Gliwice 1998.
- 9. Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A.: Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji, PWN, Warszawa 1980.
- 10. Fischer P.: Zur gegenseitigen Abhängigkeit von Dicke, Breite und Ausgangs drahtdurchmesser beim Flachpressen von Runddraht. Draht – Welt 49, 1963, nr 1, s. 1.
- 11. Guang -Ying Li : Analytical Equations for On-line Modelling of Friction in Cold Rolling. Modelling of Metal Rolling Processes, 13-15 December 1999, London, p. 370.
- 12. Grochowski E., Witek F.: Wpływ gniotu na wielkość poszerzenia przy spłaszczaniu. Wiadomości Hutnicze, 1969, T. 25, nr 10, s. 336.
- 13. Greń J.: Statystyka matematyczna modele i zadania. PWN, Warszawa 1978.
- 14. Grosman F., Herian J., Oskędra K.: Analysis of metal flow flatetening of round wires in cold, Conference Proceedings Wire and Cable Technical Symposium. 69th Annual Convention. Atlanta, Georgia, USA, May 1999.
- 15. Herian J.: Analiza płynięcia metalu podczas płaszczenia drutów okrągłych w procesie walcowania na zimno. Inżynieria Materiałowa, 1999, nr 3-4, s. 177.
- Herian J., Oskędra K.: The influence of friction condition on widening of the flatted steel cold-rolled wires. International Technical Conference, Zakopane, Poland, 10-12 October 1999.
- Herian J.: Wpływ warunków walcowania na zimno na poszerzenie płaszczonych drutów. Materiały konferencji, Walcownictwo 99, Procesy - Narzędzia - Wyroby, Ustroń październik 1999, s. 139.
- 18. Herian J., Grosman F.: Poszerzenie pasma w procesie płaszczenia drutu w walcarce. Hutnik - Wiadomości Hutnicze, 2000, nr 4, s. 171.
- 19. Herian J.: Wpływ średnicy drutu i parametrów walcowania na poszerzenie płaszczonych drutów ze stali niskoweglowej. Hutnik Wiadomości Hutnicze, 2000, nr 5, s. 188.
- 20. Heriam J.: Poszerzenie płaszczonych drutów okrągłych ze stali węglowych po patentowaniu. Hutnik Wiadomości Hutnicze, 2000, nr 7, s. 283.
- 21. Herian J.: Analiza wpływu średnicy walców i warunków tarcia na poszerzenie płaszczonych drutów okrągłych ze stali niskowęglowej w czasie walcowania na zimno. Sprawozdanie z pracy n-b BW- 477/RM2/99 Politechnika Śląska, Katowice 1999.
- 22. Herian J, Okędra K.: The influence of friction conditions on widening flatened steel coldrolled wires. Wire Journal International, 2001, vol. 34, nr 2, s. 88.
- 23. Herian J.: Ocena przydatności wzorów do obliczania poszerzenia podczas płaszczenia drutów na zimno. Hutnik Wiadomości Hutnicze, 2002, nr 11,s. 422.

- 24. Herian J.: Poszerzenie i promień powierzchni swobodnej pasma podczas jednoprzepustowego płaszczenia drutów okrągłych ze stali węglowych. Materiały konferencji, Walcownictwo 2002, Procesy - Narzędzia - Wyroby, Ustroń październik 2002, s. 91.
- 25. Herian J. : Poszerzenie w procesie płaszczenia drutów okrągłych na zimno. Metallurgičeskaja i Gornorudnaja Promyšlennost, ISSN 0543-5749, 2002, nr 8-9, s. 29.
- 26. Jaglarz Z., Leskiewicz W., Morawiecki M.: Technologia i urządzenia walcowni wyrobów płaskich, Śląsk ,Katowice 1979.
- 27. Janas K.: Walcowanie na zimno drutu płaskiego. Wiadomości Hutnicze, 1957, t. 13, nr 4, s. 103.
- 28. Kabat J.: Drut spłaszczony a jego średnica. Obróbka Plastyczna Metali 1996, nr 1, s. 45.
- 29. Kobayashi S.: Cosaj to Kako. I cz. Jap. Soc. Tech. Plast., t. 19, 1978, nr 210, s. 630.
- 30. Klekovkina N., Klekovin A., Ogolichin S.: Nerżawejuščaja provoloka i pljusčenaja lenta osobo wysokoj procnosti. Biull. CNI Černoj Metallurgii. 1984, nr 2, s. 45.
- 31. Košelenko V.P., Ruker V.N., Kuzina T.G., Tkačenko A.P.: Matematičeskaja model' dlja razčeta geometričeskich parametrov pri pluščenii lent. Izvestija Wysšych Učebnych Zavedenij. Černaja Metallurgija, 1994, nr 1, s. 37.
- 32. Koselenko V.P., Ruker V.N., Kuzina T.G., Tkačenko A.P.: Ispol'zowanie funkcij toka dlja razčeta geometriceskich i kinematičeskich parametrov prokatki pri pljuscenii lenty. Izvestija Wyssych Učebnych Zavedenij. Černaja Metallurgija, 1993, nr 9-10.
- 33. Kręglewski T., Rogowski T., Ruszczyński A., Szymanowski A.: Metody optymalizacji w języku Fortran, PWN, Warszawa 1984.
- 34. Krzemień A.: Poszerzenie w procesie spłaszczającego walcowania drutu okragłego Hutnik 1986, t. 53, nr 6, s. 176.
- 35. Litvinov K.I., Smirnov V.K., Charitonin V.A., Volokov W.A.: Formoizmenenije i energosilovyje parametry pri prokatke kruglych zagotovok iz titanovych splavov v gladkich walkach. Izwestija Wyzsych Učebnych Zawedenij. Černaja Metallurgija, 1983, nr 8, s. 26.
- 36. Lueg W, Treptow K-H.: Das Breiten beim Flachwalzen von Runddraht und die Bestimmung der Querschnittsform. Stahl und Eisen, 1954, Nr 14, s. 881.
- 37. Łuksza J.: Elementy ciągarstwa. AGH, UWN-D, Kraków 2001.
- 38. Malinski M.: Statystyka matematyczna wspomagania komputerowego, Wyd. Politechnika Śląska, Gliwice 2000.
- 39. Misiołek W., Zasadziński J.: Analyse der Abflachung von Drähten im Ziehvorgang unter Einsatz Rollenziehdüsen. Draht, T 33, 1982, nr 2, s. 478.
- 40. Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E.: Przeróbka plastyczna. Podstawy teoretyczne, Śląsk, Katowice 1986.
- 41. Mutiev M.S.: Kalibrovka černowych valkov: Metallurgija, Moskva 1972.
- 42. Olszewski M., Tomczak E.: Spłaszczanie drutów oporowych. Obróbka Plastyczna. 1959, t. 1, z. 1, s. 85.
- 43. Pietrzyk M.: Metody numeryczne w przeróbce plastycznej metali. Skrypty Uczelniane 1303, AGH, Kraków 1992.
- 44. Pietrzyk M.: Klasyczna teoria walcowania w świetle rozwiązania metodą elementów skończonych. Obróbka Plastyczna, T. XXV, z. 1, 1996, s. 5.
- 45. Petrov V.A., Morenko V. A.: Koefficeient trenija pri cholodnoj prokatke lenty. Metiznoje Proizvodstvo, 1972, nr 1, s. 135.
- 46. Pomp A., Höle H., Leug W.: Die Breitung beim Flachwalzen von Runddraht aus Stahl Stahl und Eisen, 1938, z. 35, s. 937.
- 47. Polek Z., Cisek M.: Zagadnienie poszerzania przy spłaszczaniu drutu stalowego. Wiadomości Hutnicze 1965, t. 21, nr 4, s. 112.
- 48. Polek Z., Grabiec J., Jackowski J.: Ustalenie parametrów wpływających na poszerzenie materiału przy płaszczeniu drutów ciągnionych ze stali węglowych, Praca badawcza AGH, Kraków 1978.
- Poliakov M.G., Prutow Ju.A., Niżnik P.P.: Razčet predel'nych obżatij pri prokatke pljušcenoj lenty. Stal, 1974, nr 3, s. 279.
 Do Boja M. Torreuchi V. Tocharologija projzuodetwa pljuščenoj lenty s uluščennymi

50. Rajz M., Tarnavski V.: Technologija proizvodstva pljuščenoj lenty s ulučšennymi mechaničeskimi svojstvami. Stal. 1984, nr4, s. 64.

- 51. Ruker W.N.: Razčet usilij pri pljuščeni lent. Černaja metallurgia . 1988, nr 10, s. 193.
- 52. Rytel K.: Promień boku swobodnego w procesie spłaszczania drutu. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu, Mechanika z. 30, Nr kol. 136/1990, s. 83.
- Skołyszewski A., Łuksza J., Witek F., Paćko M.: Aspekt of the process of manufacturing of fine flattened wires of high – alloy steels. International Technical Conference, Zakopane, Poland, 10-12 October 1999.
- 54. Skołyszewski A., Łuksza J. i inni: Badania parametrów technologicznych, warunków odkształcania, geometrii narzędzi oraz ich wpływ na własności eksploatacyjne i jakość cienkich drutów profilowanych ze stali stopowych i wysokostopowych, AGH, Zakład Przeróbki Plastycznej Kraków, Praca badawczo-rozwojowa nr 1923/C. T08-7/97 objęta projektem celowym Nr 7 T08B 064 96C/3200 (niepublikowane).
- 55. Skołyszewski A., Łuksza J., Rumiński M., Paćko M.: Nowe technologie wytwarzania taśm ze stali kwasoodpornych do produkcji sprężyn o wysokich własnościach zmęczeniowych. Hutnik-Wiadomości Hutnicze, 2002, nr 7, s. 292.
- 56. Smirnov V.S.: Teoria prokatki. Metallurgia, Moskva 1967.
- 57. Suchoń M., Jakubek Cz.: Produkcja taśm spłaszczonych z drutu. Hutmasz 1991, nr 2-3, s. 17.
- 58. Szczepiński W.: Wstęp do analizy procesów obróbki plastycznej, PWN, Warszawa 1967.
- 59. Tarnovskij I.Ja., Pozdejev A.A. i inni: Teorija obrabotki metallov davlenijem G. N-T. I.L.Cz. i C.M. Moskva 1963.
- 60. Titov A.M., Nikitin V.A., Klibanov E.A.: Izmenenije technlogii izgotovlenija stalnoj lenty dlja cholodilnych kompresorov. Biul. Čermiet. Infor. 1986, nr 11, s. 56.
- 61. Weber R.D.: Wire Flattening Theory. The Wire Industry. 1956, T. 9, nr 23, s. 811.
- 62. Vladimirow I.V., Niżnik P.P, Prutov J.A.: Proizvodstvo pljuščenoj stalnoj lenty. Moskva. Metallurgija 1985.
- 63. Zimpel J.: Spłaszczanie drutu do wyrobu zawleczek. Obróbka Plastyczna Metali, 1998, nr 2, s. 55.
- 64. Zlotnikov M.I.: Opredelenie ischodnogo diametra provoloki pri proizvodstve uzkoj stal noj lenty. Metiznoje proizvodstvo. 1960 nr 5, s. 476.
- 65. Zlotnikov M.I.: Proizvodstvo pljuščenoj lenty, Metallurgizdat, 1951.
- 66. Wusatowski Z.: Podstawy walcowania, Wyd. Górniczo Hutnicze, Katowice 1960.
- 67. Wusatowski Z., Lenart K.: Próba określenia rozszerzenia i wydłużenia miękkiej stali przy walcowaniu na zimno. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika nr 5, PWN, Kraków 1958, s. 41.
- 68. Praca zbiorowa pod redakcją Szapiro T.: Decyzje menadżerskie z Exelem, PWE, Warszawa 2000.

69. How to run Forge 3. Users Guide, Transvalor SA, Sophie Antipolis, France, 1999.

POSZERZENIE I ZMIANA KSZTAŁTU PASMA W PROCESIE PŁASZCZENIA DRUTÓW

Streszczenie

W pracy dokonano analizy poszerzenia oraz zmian zarysu przekroju poprzecznego pasma w procesie jedno- i wieloprzepustowego płaszczenia drutów o przekroju kołowym na wąskie taśmy.

Na podstawie analizy danych literaturowych oraz rezultatów wstępnych badań wykazano, że zmiany poszerzenia w procesie płaszczenia drutów o przekroju kołowym w wieloprzepustowym walcowaniu można opisać dwoma odrębnymi funkcjami: - dla fazy I odkształcania okrągłego drutu i - dla fazy II dalszego odkształcania drutu po wstępnym jego spłaszczeniu. Rozdzielenie procesu wieloprzepustowego płaszczenia drutów na dwie fazy umożliwiło opracowanie związków opisujących poszerzenie pasma dla każdej z nich oddzielnie oraz obliczenie wielkości całkowitego poszerzenia dla obu faz. Występujące we wzorach współczynniki zależne od parametrów procesu, początkowej średnicy drutu i własności wytrzymałościowych materiału wyznaczono eksperymentalnie. Przeprowadzona weryfikacja zależności opisujących poszerzenie pasma z wynikami eksperymentu w pełni potwierdza słuszność opracowanych funkcji opisujących poszerzenie, w tym funkcji opisującej poszerzenie pasma w procesie płaszczenia drutów ze stali węglowych o różnych własnościach wytrzymałościowych.

Zarys kształtu poprzecznego pasma po jedno- i wieloprzepustowym płaszczeniu drutów wyrażono za pomocą funkcji opisujących promień zarysu powierzchni swobodnej i szerokość styku metalu z walcem. Przeprowadzona weryfikacja zależności opisujących promień zarysu powierzchni swobodnej podczas płaszczenia drutów okrągłych w jednoprzepustowym walcowaniu potwierdziła poprawność jego opisu dla wartości gniotu względnego $\varepsilon_h < 0.5$, a dla wieloprzepustowego walcowania do wartości całkowitego gniotu względnego $\varepsilon_{hc} \le 0.85$.

Wykazano, że charakter zmian poszerzenia i promienia powierzchni zarysu pasma wynikający z obliczeń numerycznych symulacji procesu płaszczenia drutów na zimno, jak również z obliczeń według opracowanych zależności funkcyjnych w zależności od odwrotności całkowitego współczynnika gniotu jest adekwatny do wyników eksperymentu.

Na podstawie zależności opisującej poszerzenie opracowano algorytm doboru parametrów początkowych drutu dla zadanych wymiarów taśmy, którą można uzyskać w procesie płaszczenia metodą walcowania dla danej średnicy walców przy minimalnej liczbie przepustów oraz przyjętego dla nich zakresu wartości gniotu względnego.

WIDENING AND THE CHANGE OF SHAPE OF A BAND IN THE PROCESS OF FLATTENING THE WIRES

Summary

The analysis of widening and the changes of profile of the band lateral section in the process of single and multi pass flattening of the wires of a round section into narrow strips have been presented in the thesis.

Basing on literature data analysis and the results of preliminary examinations, it has been shown that the changes of widening in the process of round section wire flattening in the multi pass rolling process can be described by two different functions:

- one for the first deformation phase of a round wire,
- another for the second phase of further deformation of the wire after its initial flattening.

Dividing the process of multi pass wire flattening into two phases enabled to elaborate the dependence which defines widening of the band for each phase separately and to calculate the size of total widening for these two phases. Coefficients in the formulae, which depend on the process parameters, the initial wire diameter and mechanical properties of the material, have been determined experimentally. The performed verification of the dependences describing the band widening and comparison with the experimental results fully confirmed correctness at the elaborated functions. This also concerns the functions which describe the bands in the process of flattening of carbon steel made of wires of different mechanical properties.

A profile of the band lateral section after single and multi pass flattening of wires has been presented functions which describe the radius of free surface profile and the metal contact width with the roll.

The performed verification of dependencies which describe the radius of free surface profile in round wires flattening process during single pass rolling confirmed the correctness of the description for the $\varepsilon_h < 0.5$ of relative draft and for multi pass rolling up to the $\varepsilon_{hc} \leq 0.85$ of total relative draft.

It has been shown that the nature of changes in the widening and radius of band profile surface resulting from numerical calculations of simulation during cold wires flattening process as well as from calculations carried out according to elaborated function dependencies with reference to the inverse of total draft coefficient appears to be quite adequate to the results of the experiment.

On the basis of the dependence which describes widening, the algorithm of selecting the initial parameters of wire for chosen strip diameters has been elaborated. Such a strip can be produced during the process of flattening by the method of rolling using a given diameter of rolls at minimal number of passes and for specially chosen range of values of a relative draft

BREITUNG UND ÄNDERUNG DER BANDFORM IM PROZEB DER DRÄHTEABFLACHUNG

Zusammenfassung

In der Arbeit wurde die Analyse der Breitung und Änderung des Profils des Bandquerschnittes im Prozeß der einfachen und mehrfachen Abflachung von Drähte mit Kreisquerschnitt auf schmale Bänder durchgeführt.

Auf Grund der Analyse von Litaraturangaben und von Ergebnissen der Vorforschungen wurde nachgewiesen, daß die Breitungsänderungen im Prozeß der Abflachung von Draht mit Kreisquerschnitt im mehrfachigen Walzen mit zwei gesonderten Modellen beschrieben werden können:- für die Phase I der Verformung von Runddraht und für die Phase II der weiteren Drahtverformung nach dessen Vorabflachung. Die Verteilung des Prozesses der mehrfachigen Abflachung von Draht in zwei Phasen hat es ermöglicht, die Funktionen zu bearbeiten, die die Breitung des Streifens für jede Phase getrennt beschreiben und die Grösse der Gesamtbreitung für beide Phasen zu berechnen. Die in den Formeln auftretenden von Prozeßparametern, vom Anfangsdurchschnitt des Drahtes und von Festigkeitseigenschaften des Materials abhängigen Koeffizienten wurden experimental bestimmt. Die die Streifenbreitung beschreibende durchgeführte Verifikation der Abhängigkeiten mit den Versuchsergebnissen bestätigt vollkommen die Billigkeit der bearbeiteten Funktionen, die die Breitung beschreiben, darin der Funktion, die Streifenbreitung im Prozeß der Abflachung von Draht aus Kohlenstahlen mit unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften beschreibt.

Das Profil der Form des Bandquerschnittes nach der einfachen und mehrfachen Drahtabflachung wurde mit Hilfe von den Funktionen ausgedrückt, die das Radius des Profils der freien Fläche und die Stoßbreite des Metalls mit der Walze beschreiben. Die durchgeführte Verifikation der Abhängigkeiten, die das Radius des Profils der freien Fläche während der Abflachung von Runddrähte im einfachen Walzen bestimmen, hat die Richtigkeit seiner Beschreibung für die Werte der bezogenen Höhenabnahme $\varepsilon_h < 0.5$ bestätigt, und für das mehrfache Walzen bis zum Wert der bezogenen Gesamthöhenabnahme $\varepsilon_h < 0.5$.

Es wurde nachgewiesen, daß der Charakter der Änderungen der Breitung und des Radius der Bandprofilfläche, der sich aus numerischen Berechnungen der Simulation von

der Kaltabflachung von Draht, als auch aus Berechnungen nach den bearbeiteten funktionellen Formeln, abhängig vom Kehrwert des Gesamtkoeffizienten der Höhenabnahme ergibt, mit den Versuchsergebnissen übereinstimmend ist

Auf Grund der die Breitung beschreibenden Abhängigkeit wurde ein Algorithmus der Auswahl der Drahtanfangangsparameter für die angegebenen Bandausmaße bearbeitet. Dieses Band kann beim Flachwalzen für den angegebenen Walzendurchschnitt bei der minimalen Anzahl der Stiche und bei dem für die angenommenen Wertebereich der bezogenen Höhenabnahme erreicht werden.

| ERRATA | | | |
|-----------------------|--|--|--|
| do ZN Hutnictwo z. 66 | | | |

| Str./ | Jest | Powinno być |
|------------------|---|---|
| wiersz | | |
| 9/6 | b _i - pasma po n-tym | b _n - szerokość pasma |
| 9/7 | b _n - bieżąca szerokość | b _i - szerokość pasma |
| 9/8 | b _x - szerokość pasma | b _x - bieżąca szerokość pasma |
| 9/34 | np. | np |
| 31/3 | Lueg | Leug |
| 31/18 | [11] | [13] |
| 32/2 | statystki | statystyki |
| 37/26 | [13 ÷ 25] | [14 + 25] |
| 42/1 | $[\ln(1/\gamma_{1m}), \ln(1/\gamma)]$ | $[\ln(1/\gamma_{1m}), \ln(1/\gamma_{1})]$ |
| 42/ | Ba | Ben |
| rvs. 20 | | μeth |
| 48/ (wzór 35) | $r_{n} = \frac{h_{n}^{2}}{b_{n} \left(1 - \frac{b_{sn}}{b_{n}}\right)} + b_{n} \left(1 - \frac{b_{sn}}{b_{n}}\right)$ | $\left r_n = \frac{1}{4} \left[\frac{h_n^2}{b_n \left(1 - \frac{b_{sn}}{b_n} \right)} + b_n \left(1 - \frac{b_{sn}}{b_n} \right) \right]$ |
| 78/4 | (48) | (44) |
| 79/ | WsakaYnik, Wspó cz. | Wskaźnik, Współcz. |
| tablica 18 | | |
| 83/4 | (ldx) | (l _d) |
| 104/11 | w czwartym | w drugim |
| 105/ | w przepuście 4 | w przepuście 2 |
| rys. 69 | | |
| 124/ гуз. 80 | -2112 | 21.02 |
| | | 14,80 (19) |
| 141/46 | Hole | Höhle |

