

Henryk DYJA, Sebastian MRÓZ, Anna KAWAŁEK, Piotr SZOTA, Andrzej STEFANIK

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej

# WERYFIKACJA NUMERYCZNEGO MODELU WALCOWANIA BLACH I PRĘTÓW Z GATUNKÓW STALI KONSTRUKCYJNEJ SUPERDROBNOZIARNISTEJ I WYSOKOWĘGŁOWEJ BAINITYCZNEJ, OPRACOWANEGO DLA WARUNKÓW TECHNICZNYCH LPS I WARUNKÓW PRZEMYSŁOWYCH

*W pracy testowano numeryczne modele walcowania blach i prętów z gatunków stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej bainitycznej w zakresie parametrów charakterystycznych dla linii walcowniczej LPS i procesów przemysłowych. Do analizy numerycznej procesu walcowania blach i prętów wykorzystano program komputerowy Forge2008®. Do testowania modelu walcowania blach w warunkach przemysłowych wybrano walcownię blach huty ISD Częstochowa Sp. z o.o. Natomiast do testowania modelu walcowania prętów w warunkach przemysłowych wybrano walcownię ciągłą prętów huty CMC Zawiercie S.A. Po wykonaniu obliczeń testowych, z wykorzystaniem opracowanych modeli walcowania blach i prętów, poddano ocenie dokładności testowanego modelu metodą porównania wyników symulacji z danymi rzeczywistymi. Przeprowadzone badania teoretyczne wykazały, że opracowane modele matematyczne walcowania są prawidłowe i mogą być stosowane do analizy procesu walcowania wyrobów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i stali wysokowęglowej bainitycznej.*

*Słowa kluczowe:* walcowanie, blachy, pręty, modelowanie numeryczne, MES

## VERIFICATION OF THE NUMERICAL MODEL OF ROLLING OF STRUCTURAL ULTRA-FINE GRAINED AND HIGH-CARBON BAINITIC STEEL PLATES AND BARS DEVELOPED FOR THE LPS TECHNICAL CONDITIONS AND INDUSTRIAL CONDITIONS

*Numerical models of rolling plates and bars of constructional ultra-fine-grained and high-carbon bainitic steel grades were tested in this work in the range of parameters specific to the LPS rolling line and industrial processes. For the numerical analysis of the plate and bar rolling process the Forge2008® software was used. For testing of the plate rolling model under the industrial conditions the Plate Rolling Mill of the ISD Częstochowa Sp. z o.o. Steelworks was selected, while for testing of the bar rolling model under the industrial conditions, the Continuous Bar Rolling Mill of the CMC Zawiercie S.A. Steelworks was chosen. After test computations using the developed plate and bar rolling models, the tested models were assessed for accuracy by comparing the simulation results with actual data. The theoretical studies carried out showed that the developed numerical models of rolling were correct and could be used for the analysis of the process of rolling products of ultra-fine-grained constructional steel and high-carbon bainitic steel.*

*Key words:* rolling, plates, bars, numerical modelling, FEM

### 1. WPROWADZENIE

Metody numeryczne, zwłaszcza termomechaniczna analiza oparta na metodzie elementów skończonych (MES), znalazły szerokie zastosowanie w matematycznym modelowaniu procesu walcowania wyrobów płaskich i kształtowych [1-3]. Stosując programy komputerowe oparte na MES do projektowania technologii walcowania można odwzorować rzeczywisty proces bez konieczności uwzględniania szeregu uproszczeń i ograniczeń z dokładnością pozwalającą na szybkie wdrożenie opracowanej technologii.

W pracy testowano numeryczne modele walcowania blach i prętów kwadratowych z gatunków stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej (Stal A) i wysokowęglowej bainitycznej (Stal B) w zakresie parametrów charakterystycznych dla linii LPS i procesów przemysłowych. Do testowania modelu walcowania blach w warunkach przemysłowych wybrano walcownię blach huty ISD Częstochowa Sp. z o.o. Dla warunków linii LPS testowano walcowanie blachy o wymiarze 250×8 mm, a dla warunków przemysłowych walcowanie blach o wymiarach 1500×8 mm. Natomiast dla prętów kwadratowych testowano walcowanie prętów o wymiarach

35×35 mm dla warunków linii LPS oraz dla prętów kwadratowych o wymiarach 45×45 mm dla warunków walcowni ciągłej D350 huty CMC Zawiercie S.A.

Po wykonaniu obliczeń testowych z wykorzystaniem opracowanych modeli walcowania prętów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej bainitycznej poddano ocenie dokładności testowanego modelu metodą porównania wyników symulacji z danymi rzeczywistymi.

Do analizy procesu walcowania blach wykorzystano program komputerowy Forge2008® [4], zakładając lepo-plastyczny model odkształcanego metalu i trójosiowy stan odkształcenia.

## 2. WARUNKI BRZEGOWE I PARAMETRY POCZĄTKOWE PRZYJĘTE DO OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Zastosowanie programu komputerowego Forge2008® z wykorzystaniem zawartych w nim modeli termomechanicznych wymaga zdefiniowania warunków brzegowych, decydujących o poprawności obliczeń numerycznych. Dlatego szczególny wpływ na wyniki obliczeń mają: właściwości badanej stali, warunki tarcia oraz parametry kinetyczne i termiczne opisujące proces walcowania. Parametry początkowe i warunki brzegowe przyjęto na podstawie danych zamieszczonych w pracach [5, 6] oraz danych otrzymanych z ISD Częstochowa Sp. z o.o i CMC Zawiercie S.A.

W prowadzonych symulacjach komputerowych procesu walcowania blach i prętów w warunkach linii LPS oraz w warunkach walcowni ISD Częstochowa Sp. z o.o i CMC Zawiercie S.A. zastosowano współczynnik wymiany ciepła równy  $3000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Wartość współczynnika została dobrana z bazy programu Forge2008® i została potwierdzona w obliczeniach wykonanych na podstawie pomiarów temperatury kamerą termowizyjną w warunkach walcowni ciągłej CMC Zawiercie S.A. Temperaturę powierzchni walca przyjęto równą  $60^\circ\text{C}$  również na podstawie pomiarów termowizyjnych oraz na podstawie danych zawartych w pracy [7].

Podczas symulacji walcowania i chłodzenia zastosowano współczynnik wymiany ciepła równy  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . W przypadku symulacji z przyspieszonym chłodzeniem przyjęto współczynnik wymiany ciepła wynoszący  $5500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (intensywne chłodzenie wodą).

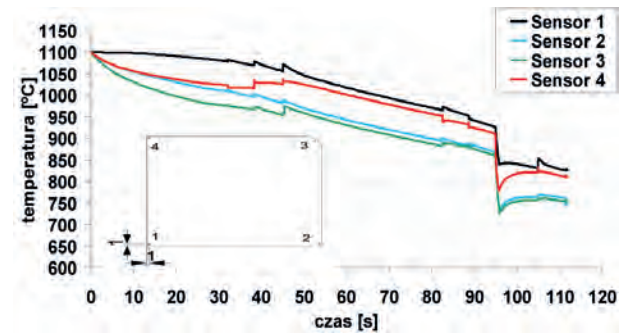
Pozostałe parametry procesu walcowania dotyczące głównie kinetyki procesu oraz temperatury początkowej i wymiarów wsadu dobrano na podstawie instrukcji technologicznych.

## 3. WYNIKI NUMERYCZNEGO MODELOWANIA PROCESU WALCOWANIA BLACH O WYMIARACH 250×8 mm W WARUNKACH LINII LPS

Na podstawie wyników obliczeń numerycznych wyznaczono przebieg zmian temperatury oraz parametrów energetyczno-siłowych podczas walcowania blachy 250×8 mm w linii walcowniczej LPS. W związku z przenoszeniem rozkładu temperatury do kolejnych przepustów oraz w celu dokładnej interpretacji wyników symulacji komputerowych wprowadzono do mo-

delu geometrycznego cztery sensory, tzn. punkty, dla których rejestrowane są wartości różnych parametrów obliczonych w ustalonych krokach obliczeniowych.

Na rys. 1 przedstawiono przykładowy przebieg zmian wartości temperatury dla czterech charakterystycznych punktów pasma podczas walcowania i chłodzenia blachy o wymiarach 250×8 mm ze stali A w warunkach linii walcowniczej LPS.



Rys. 1. Przebieg zmian temperatury podczas walcowania blachy 250×8 mm ze stali A w linii walcowniczej LPS

Fig. 1. Temperature distribution during rolling of 250×8 mm plates from steel grade A in the LPS rolling line

Analizując dane zamieszczone na rys. 1 można stwierdzić, że podczas procesu walcowania następuje wzrost temperatury, który obserwowany jest jako nagły przyrost temperatury w krótkich przedziałach czasowych, trwających kilka dziesiątych sekundy. W początkowych etapach procesu walcowania najmniejsza temperatura jest obserwowana dla sensora 3 umieszczonego na narożu odkształcanego wsadu. Natomiast podczas trwania procesu pod wpływem odkształcenia sensor 3 przemieszcza się na powierzchnię blachy, która styka się z walcami. W tym czasie powierzchnia boczna blachy w pobliżu osi symetrii zaczęła się chłodzić najszybciej ze względu na mniejszą ilość generowanego ciepła odkształcenia oraz kontakt z otoczeniem – sensor 2. Najmniejszy spadek temperatury w początkowych etapach procesu (do 3 przepustu i operacji cięcia po przepuscie 3) jest obserwowany dla sensora umieszczonego wewnątrz odkształcanego pasma. Otrzymanie struktury drobnoziarnistej jest możliwe w procesie walcowania w ostatnich przepustach, jeżeli temperatura pasma dla stali A po ostatnim przepuscie będzie wynosić  $830^\circ\text{C}$ .

Na podstawie otrzymanych wyników badań numerycznych wyznaczono wymiary blachy oraz parametry energetyczno-siłowe: całkowity nacisk metalu na walce, moment i moc walcowania po poszczególnych przepustach (tablice 1 i 2).

Analizując dane przedstawione w tablicach 1 i 2 można stwierdzić, że zastosowanie stali typu C, w porównaniu do stali typu A wpływa na otrzymanie większych wartości parametrów energetyczno-siłowych. Wpływa na to większa wartość naprężenia uplastyczniającego dla stali typu C, w porównaniu do naprężenia uplastyczniającego stali typu A. Analizując obciążenie walcarki można stwierdzić, że podczas walcowania blachy ze stali typu A w przepustach 1, 4–7 nie przekroczy 76% obciążenia napędu głównego walcarki. W przypadku walcowania blachy 250×8 mm w przepuscie 3 obciążenie walcarki będzie wynosić 98%. Taka wartość obciążenia napędu głównego podczas walcowania bla-

Tablica 1. Wyniki obliczeń numerycznych procesu walcowania blachy 250×8 mm w warunkach linii walcowniczej LPS dla stali A

Table 1. Results of numerical computations for rolling of 250×8 mm plate under LPS conditions for steel A

Przepust	Wymiary pasma [mm]			Pole	Długość	Wydlużenie	Gniot	Siła nacisku	Moment	Moc
	$h_p$	$h_k$	$b$	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$l$ [mm]	$\lambda$	$\epsilon_h$ [%]	$F$ [kN]	$M$ [kNm]	$P$ [kW]
wsad	50,00	-	250,00	12482,5	1000	-	-	-	-	-
1	50,00	40,00	255,04	10201,3	1224	1,224	20,0	1342,7	76,3	263,2
2	28,00	28,00	263,15	7338,9	1701	1,390	30,0	1803,1	<b>105,3</b>	370,0
3	18,50	18,50	270,91	4997,3	2498	1,469	33,9	1953,1	98,1	344,0
4	14,00	14,00	272,15	3803,9	3282	1,314	24,3	1747,9	61,7	214,4
5	11,00	11,00	273,86	3016,3	4138	1,261	21,4	1565,3	45,0	155,6
6	9,00	9,00	275,34	2488,0	5017	1,212	18,2	1899,2	45,3	154,0
7	8,00	8,00	275,44	2217,5	5629	1,122	11,1	1242,9	21,9	380,0

Tablica 2. Wyniki obliczeń numerycznych procesu walcowania blachy 250×8 mm w warunkach linii walcowniczej LPS dla stali C

Table 2. Results of numerical computations for rolling of 250×8 mm plate under LPS conditions for steel C

Przepust	Wymiary pasma [mm]			Pole	Długość	Wydlużenie	Gniot	Siła nacisku	Moment	Moc
	$h_p$	$h_k$	$b$	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$l$ [mm]	$\lambda$	$\epsilon_h$ [%]	$F$ [kN]	$M$ [kNm]	$P$ [kW]
wsad	50,00	-	250,00	12482,5	1000	-	-	-	-	-
1	50,00	40,00	255,53	10223,1	1221	1,221	20,0	<b>2767,0</b>	<b>158,2</b>	542,4
2	28,00	28,00	261,33	7301,1	1710	1,400	30,0	<b>3569,0</b>	<b>219,3</b>	777,2
3	18,50	18,50	265,62	4911,2	2542	1,487	33,9	<b>3678,0</b>	<b>195,2</b>	637,9
4	14,00	14,00	266,70	3736,7	3341	1,314	24,3	<b>3124,6</b>	<b>115,4</b>	401,4
5	11,00	11,00	268,16	2961,1	4215	1,262	21,4	<b>2719,4</b>	81,7	278,6
6	9,00	9,00	268,6	2432,3	5132	1,217	18,2	<b>3248,2</b>	80,8	270,4
7	8,00	8,00	269,03	2168,4	5757	1,122	11,1	2317,2	45,9	156,9

chy 250×8 mm w warunkach rzeczywistych może doprowadzić do przekroczenia dopuszczalnych wartości obciążenia walcarki.

Podczas walcowania blachy 250×8 mm ze stali A w przepuście 2 odnotowano 5% przekroczenie maksymalnego momentu walcowania dla analizowanej walcarki. Walcowanie blachy 250×8 mm ze stali C powoduje znaczny wzrost obciążenia walcarki. Na podstawie wyników badań numerycznych dla przepustów 1-6 nastąpiło przekroczenie obciążenia walcarki, największe dla przepustu nr 2 o ponad 200% oraz dla przepustu nr 3 o około 195%. Jedynie dla przepustu 7 wartości wyznaczonych parametrów energetyczno-siłowych nie przekracza maksymalnych dopuszczalnych obciążeń. Stąd też można stwierdzić, że dla zaproponowanego schematu odkształceń nie jest możliwe przeprowadzenie procesu walcowania blachy 250×8 mm ze stali typu C, natomiast dla stali typu A konieczne jest wprowadzenie korekty schematu odkształcenia w przepuście 2.

#### 4. WYNIKI NUMERYCZNEGO MODELOWANIA PROCESU WALCOWANIA BLACH O WYMIARACH 1500×8 mm W WARUNKACH WALCOWNI ISD CZĘSTOCHOWA Sp. z o.o.

W ramach prowadzonych badań teoretycznych dotyczących numerycznego modelowania procesu walcowa-

nia blach o wymiarach 1500×8 mm i weryfikacji otrzymanych wyników na podstawie danych rzeczywistych z walcowania w warunkach przemysłowych w ISD Częstochowa Sp. z o.o. stwierdzono, że weryfikacja może być znacznie utrudniona. Trudność w porównaniu wyników wynika z faktu, że w przypadku walcowni ISD Częstochowa Sp. z o.o. nie jest walcowany asortyment w gatunkach stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysoko węglowej bainitycznej. Dane otrzymane z huty ISD Częstochowa Sp. z o.o. dotyczyły blach o wymiarach 1500×8 mm walcowanych ze stali S235JR.

Różnice w otrzymanych wynikach badań teoretycznych, w porównaniu z danymi rzeczywistymi, wynikają z różnych własności tych stali. Własności stali podczas numerycznego modelowania definiowane są jako naprężenie uplastyczniające w zależności od temperatury, odkształcenia rzeczywistego i prędkości odkształcenia, stąd też wartości naprężenia uplastyczniającego dla różnych gatunków stali są inne. Występujące różnice w naprężeniu uplastyczniającym wpływają na sposób odkształcania się blachy podczas walcowania, co powoduje np. różne wartości poszerzenia. Ponadto odmienne wartości naprężenia uplastyczniającego w dużym stopniu wpływają na otrzymane wartości parametrów energetyczno-siłowych. Na podstawie przekazanych danych z walcowni ISD Częstochowa Sp. z o.o. wykonano zestawienie porównawcze całkowitej siły nacisku metalu na walce w porównaniu do wyników otrzymanych podczas numerycznego modelowania (tabl. 3).

**Tablica 3. Wyniki całkowitej siły nacisku metalu podczas walcowania blach 1500x8 mm**

**Table 3. Results of total metal pressure force during rolling of 1500x8 mm plates**

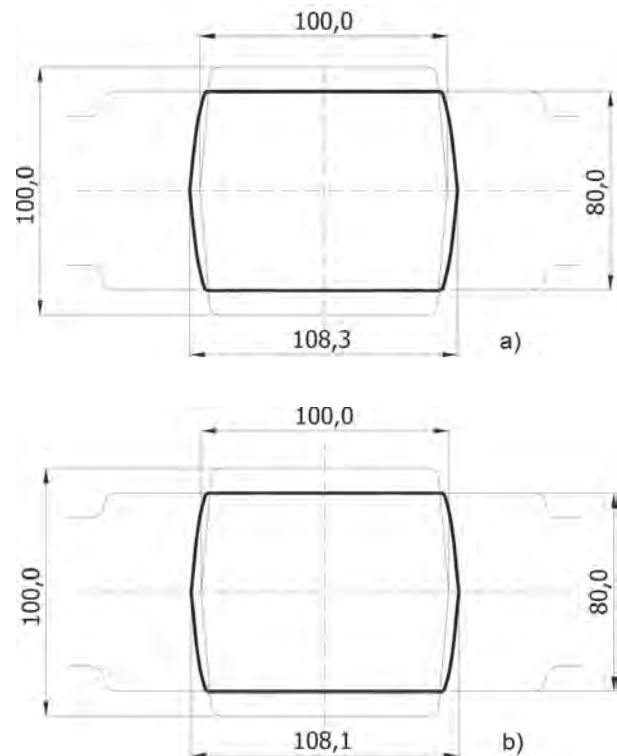
Przepust	Całkowita siła nacisku metalu na walce podczas walcowania blachy 1500x8 mm [kN]		
	stal A	stal C	ISD S235JR
1	3918	6585	5120
2	5263	8205	6750
3	6487	10723	7870
4	6279	10449	8540
5	11945	18960	14590
6	14445	23020	17350
7	8764	15036	13241
8	15432	25252	19145
9	8306	13295	9560
10	9014	14802	11320
11	4562	8204	5570

Na podstawie danych zamieszczonych w tablicy 3 można stwierdzić, że numeryczne modelowanie walcowania poprawnie odwzorowuje rzeczywiste warunki walcowania. Przedstawione wartości całkowitej siły nacisku otrzymane podczas numerycznego modelowania procesu walcowania stali A są mniejsze, w porównaniu do całkowitej siły nacisku otrzymanej dla stali S235JR. Większe wartości otrzymano dla stali C. Otrzymane wartości całkowitej siły nacisku metalu na walce w głównej mierze zależne są od naprężenia uplastyczniającego, na które wpływ ma zawartość węgla w stali. Stal S235JR posiada zawartość węgla większą od stali A, a mniejszą od stali C.

Dodatkową trudność podczas analizy porównawczej jest brak kompletnych danych dotyczących geometrii walcowanej blachy po poszczególnych przepustach. Stosowane oprogramowania komputerowe do obsługi walcarki wstępnej i wykańczającej w hucie ISD Częstochowa Sp. z o.o. zakłada brak poszerzenia blachy. Pomiar szerokości blachy możliwy jest tylko podczas wprowadzania blachy do klatki wykańczającej. Z otrzymanych danych wynika, że blacha o wymiarze 1500x8 mm otrzymana w wyniku zastosowania numerycznego modelowania cechowała się szerokością: dla stali A po klatce wstępnej 1609,2 mm, dla stali C 1610,5 mm, natomiast podczas walcowania blachy ze stali S235JR w warunkach rzeczywistych szerokość wynosiła 1583 mm.

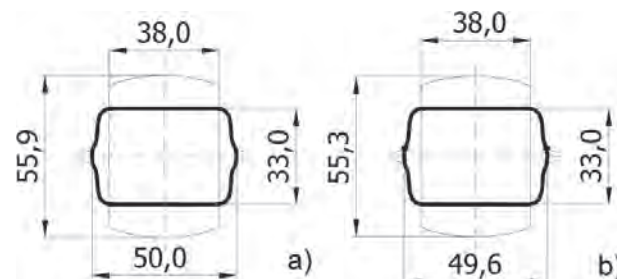
## 5. WYNIKI NUMERYCZNEGO MODELOWANIA PROCESU WALCOWANIA PRĘTÓW KWADRATOWYCH O WYMIARZE 35x35 mm W WARUNKACH LINII LPS

W pracy przeprowadzono również teoretyczne badania plastycznego płynięcia metalu podczas walcowania prętów kwadratowych o wymiarze 35x35 mm, ze stali A i C, walcowanych w warunkach linii LPS. Kształt pasma pobrano po każdym przepuszczeniu. Na rysunkach 2-4 pokazano wyniki numerycznego modelowania procesu walcowania prętów kwadratowych o boku 35 mm w warunkach linii LPS.



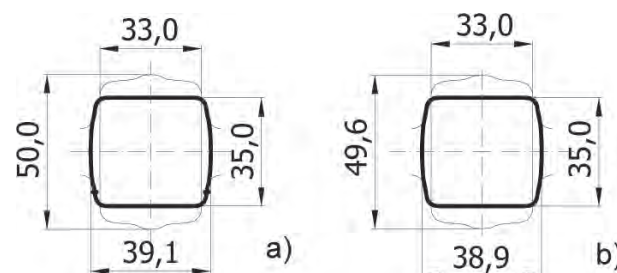
**Rys. 2. Kształt i wymiary pasma podczas walcowania pręta kwadratowego 35x35 mm w linii walcowniczej LPS – przepust 1: a) stal A, b) stal C**

**Fig. 2. Shape and dimensions of strand during rolling of 35x35 mm square bar in the LPS rolling line – pass 1: a) steel A, b) steel C**



**Rys. 3. Kształt i wymiary pasma podczas walcowania pręta kwadratowego 35x35 mm w linii walcowniczej LPS – przepust 10: a) stal A, b) stal C**

**Fig. 3. Shape and dimensions of strand during rolling of 35x35 mm square bar in the LPS rolling line – pass 10: a) steel A, b) steel C**



**Rys. 4. Kształt i wymiary pasma podczas walcowania pręta kwadratowego 35x35 mm w linii walcowniczej LPS – przepust 11: a) stal A, b) stal C**

**Fig. 4. Shape and dimensions of strand during rolling of 35x35 mm square bar in the LPS rolling line – pass 11: a) steel A, b) steel C**

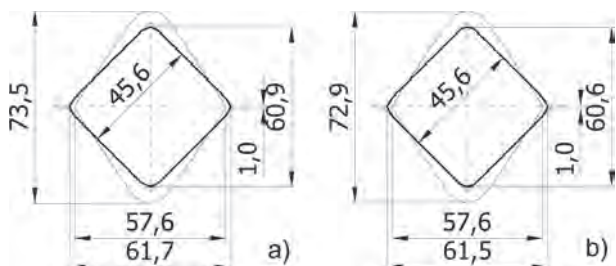
Analizując otrzymane wyniki symulacji komputerowych można stwierdzić, że walcowanie w przepustach 1-9 odbywało się tylko na płaskiej powierzchni wykroju nr 1. W przepustach 10 i 11 wykorzystano wykroje skrzynkowe do nadania odpowiedniego kształtu wyrobowi gotowemu. Porównując szerokość pasma po walcowaniu dla obydwóch gatunków stali można stwierdzić, że podczas walcowania pasma ze stali C otrzymano mniejsze poszerzenie, niż w przypadku pasma ze stali A. Zgodnie z teorią walcowania, wraz ze wzrostem własności wytrzymałościowych (stal C) maleje ich plastyczność, a zatem i ich poszerzenie [8].

Podczas walcowania w wykroju nr 3 (przepust 10), (rys. 3) otrzymano przepełnienie wykroju, a zatem pole przekroju poprzecznego pasma po przepuszczeniu 9 było zbyt duże. W celu wyeliminowania przepełnienia należy zwiększyć gniot w przepuszczeniu 9. Wystąpienie przepełnienia w przepuszczeniu 10 nie spowodowało zawalcowania pasma w przepuszczeniu 11. W wyniku walcowania pasma w przepuszczeniu 11 otrzymano pręt o wymiarach 35,0×39,0 mm. Otrzymana szerokość pręta wynosząca 39,0 mm znacznie odbiega od założonego, mimo że pręt kwadratowy jest półwyrobem. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że wykroj 4 (przepust 11) jest zbyt szeroki a pasmo wprowadzane do tego wykroju ma zbyt duże pole przekroju poprzecznego. Zwiększenie gniotu w przepuszczeniu 9 lub wcześniejszych wpłynie na wzrost dokładności wymiarowej pręta kwadratowego.

## 6. WYNIKI NUMERYCZNEGO MODELOWANIA PROCESU WALCOWANIA PRĘTÓW KWADRATOWYCH O WYMIARZE 45×45 mm W WALCOWNI CIĄGŁEJ D350

W pracy przeprowadzono również teoretyczne badania plastycznego płynięcia metalu podczas walcowania prętów kwadratowych o wymiarze 45×45 mm, ze stali A i C, walcowanych w warunkach walcowni ciągłej D350 huty CMC Zawiercie S.A. Symulacje komputerowe przeprowadzono od pieca grzewczego (wsadu) do ostatniej klatki, w której walcowany jest wyrób gotowy. Na rys. 5 pokazano przykładowe wyniki numerycznego modelowania procesu walcowania prętów kwadratowych w przepuszczeniu wykańczającym.

Analizując wyniki symulacji komputerowych stwierdzono, że walcowanie prętów kwadratowych o wymiarze 45×45 mm, z zastosowaniem kalibrowania walców

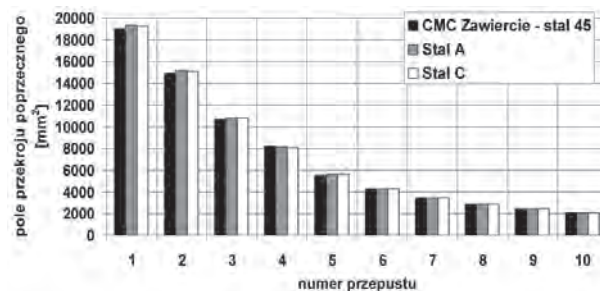


Rys. 5. Kształt i wymiary pasma uzyskanego w wyniku symulacji komputerowej procesu walcowania pręta kwadratowego 45×45 mm, przepust 10: romb - kwadrat: a) stal A, b) stal C

Fig. 5. Shape and dimensions of strand obtained as a result of computer simulation of 45×45 mm square bar rolling process – pass 10: diamond – square: a) steel A, b) steel C

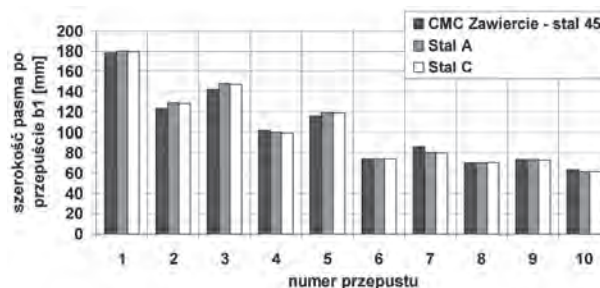
stosowanym obecnie do walcowania prętów kwadratowych w hucie CMC Zawiercie S.A. zapewnia otrzymanie wyrobu o żądanych wymiarach zgodnych z wymaganiami norm. We wszystkich wykrojach pasmo prawidłowo je wypełniło i nie nastąpiło w żadnym z nich przepełnienie. Różnica w przekątnych dla pręta kwadratowego o boku 45 mm wyniosła 0,76 mm dla pręta ze stali A i 0,9 mm dla pręta ze stali C.

Porównanie otrzymanych wartości pola przekroju poprzecznego pasma i szerokości pasma po poszczególnych przepustach pokazano na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Porównanie zmian pola przekroju poprzecznego przekroju pasma podczas walcowania prętów kwadratowych 45×45 mm w warunkach huty CMC Zawiercie S.A.

Fig. 6. Comparison of changes in strand cross section area during rolling of 45×45 mm square bars in CMC Zawiercie S.A.



Rys. 7. Porównanie zmian szerokości pasma podczas walcowania prętów kwadratowych 45×45 mm w warunkach huty CMC Zawiercie S.A.

Fig. 7. Comparison of changes in strand width during rolling of 45×45 mm square bars in CMC Zawiercie S.A.

Dla obu gatunków stali otrzymano bardzo dużą zgodność w otrzymanych wartościach pola przekroju poprzecznego i szerokości pasma, w porównaniu do wyników badań przemysłowych otrzymanych w warunkach walcowni huty CMC Zawiercie S.A.

## 4. PODSUMOWANIE

W pracy zamieszczono przykładowe wyniki numerycznego testowania modeli walcowania blach i prętów kwadratowych z gatunków stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej bainitycznej w zakresie parametrów charakterystycznych dla LPS i procesów przemysłowych.

W wyniku walcowania blach o wymiarze 250×8 mm z dwóch gatunków stali w warunkach linii LPS otrzymano różne wartości poszerzenia. Poszerzenie blachy ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej (A) było większe w porównaniu z poszerzeniem blachy ze stali

wysokowęglowej bainitycznej (C). Szerokość blachy ze stali A była większa o 6 mm.

Na podstawie wyników numerycznego modelowania określono przebieg zmian temperatury w blachach, co znacznie może ułatwić sterowanie procesem pod kątem uzyskania struktury drobnoziarnistej. Temperatura końca walcowania zawiera się w zakresie od 810°C do 960°C dla stali typu A oraz od 875°C do 900°C dla stali typu C.

Na podstawie wyników badań teoretycznych nad procesem walcowania pręta kwadratowego o wymiarze 35×35 mm w warunkach linii walcowniczej LPS stwierdzono, że podczas walcowania w przepuście 10, w wykroju 3 wystąpiło przepełnienie, które jednak nie spowodowało wady w postaci zawalcowania w następnym przepuście. Otrzymany pręt kwadratowy po przepuście 11 cechował się zbyt dużą szerokością wynoszącą 39 mm.

Analizując wyniki symulacji komputerowych plastycznego płynięcia metalu w poszczególnych przepuściach można stwierdzić, że walcowanie prętów kwadratowych o wymiarach 45×45 mm ze stali konstrukcyjnej

superdrobnoziarnistej i wysokowęglowej bainitycznej, zapewni otrzymanie wyrobu o żądanych wymiarach zgodnych z wymaganiami norm DIN i EN. Otrzymano nieznaczne różnice w przekątnych gotowych prętów spełniające wymagania odnośnych norm.

Przeprowadzone badania teoretyczne wykazały, że opracowany model matematyczny walcowania jest prawidłowy i może być stosowany do analizy procesu walcowania wyrobów ze stali konstrukcyjnej superdrobnoziarnistej i stali wysokowęglowej bainitycznej.

***Publikacja opracowana na podstawie pracy wykonanej w projekcie badawczym rozwojowym nr N R07 0008 04 pt. „Opracowanie podstaw przemysłowych technologii kształtowania struktury i właściwości wyrobów z metali i stopów z wykorzystaniem symulacji fizycznej i numerycznej” dofinansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, realizowanym przez Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach (koordynator), Akademię Górniczo-Hutniczą, Politechnikę Częstochowską, Politechnikę Śląską i Politechnikę Warszawską.***

#### LITERATURA

1. Kawalek A., Dyja H., Mroz S., Knapinski M.: Effect of plate asymmetric rolling parameters on the change of the total unit pressure of roll, *Metalurgija (Metallurgy)*, Vol. 50, br. 3, 2011, s. 163-166
2. Mróz S., Dyja H., Laber K.: Influence of the Round Bars Normalizing Rolling Process on the Energy and Force Parameters, *Steel Research International*, Vol. 1, 2008, p. 410-416.
3. Mróz S.: Modification of the roll pass design to the bar rolling process with longitudinal band separation, *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 54, 2009, p. 597-605.
4. FORGE3® Reference Guide Release 6.2, Sophia-Antipolis, November (2002).
5. Grosman F. i in.: Sprawozdanie z realizacji projektu nr N R07 0008 04/2008, Katowice 2010, niepublikowane
6. Dyja H. i in.: Sprawozdanie z realizacji projektu nr N R07 0008 04/2008, Częstochowa 2010, niepublikowane
7. Pietrzyk M., *Metody numeryczne w przeróbce plastycznej metali*, Wyd. AGH, Kraków 1992.
8. *Procesy przeróbki plastycznej*, praca zbiorowa pod redakcją Jana Sińczaka, Wyd. Akapit, Kraków 2003.