



Analiza zmian parametrów geometrycznych i energetyczno-siłowych w procesie walcowania blach przy różnych rodzajach asymetrii

Analysis of changes in geometric and force-energy parameters in plate rolling process with various types of asymmetry

(1) Anna Kawalek^{*1}, (2) Konrad Laber¹, (3) Kirill Ozhmegov²

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

² National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Leninskiy pr. 4, 119049 Moscow, Russia

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 12.04.2018

Recenzja: 11.05.2018

Akceptacja: 28.09.2018

Wkład autorów

- (1) Koncepcja, założenia, metody, nadzór merytoryczny
- (2) Analiza i interpretacja wyników badań
- (3) Przeprowadzenie symulacji numerycznych, opracowanie uzyskanych wyników

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu asymetrycznego procesu walcowania na wyginanie się początku pasma, parametry energetyczno-siłowe (siłę nacisku, momenty walcowania i moc walcowania), ugięcie sprężyste walców roboczych i stojaka klatki walcowniczej. Badania teoretyczne przeprowadzono przy wykorzystaniu programu komputerowego FORGE[®], opartego na metodzie elementów skończonych, dla pasma o wysokości początkowej $h_0=10$ mm ze stali z gatunku S690QL. Symulacje procesu walcowania wykonano dla procesu symetrycznego, dla procesu z jednym i dwoma rodzajami asymetrii. Jeden rodzaj asymetrii uzyskano poprzez zróżnicowanie prędkości walców roboczych (asymetria kinetyczna), a drugi – poprzez zróżnicowanie średnic walców roboczych (asymetria geometryczna). W przypadku jednoczesnego stosowania dwóch rodzajów asymetrii współczynniki asymetrii były równe. Otrzymane wyniki badań teoretycznych dotyczące obniżenia nacisku całkowitego porównano z wynikami uzyskanymi dla klatki wykańczającej przykładowej walcowni blach grubych 3600 i na tej podstawie określono zmniejszenie ugięcia sprężystego walców roboczych i stojaka klatki walcowniczej. Badania miały na celu określenie wpływu obniżenia wartości całkowitej siły nacisku na sprężyste ugięcie elementów klatki walcowniczej. Dzięki mniejszemu sprężystemu ugięciu walców można będzie stosować mniejsze siły przeginające walce robocze. To wpłynie na zmniejszenie odchyłek wymiarowych zarówno na długości, jak i na szerokości gotowych blach. Ponadto możliwe będzie rozszerzenie asortymentu walcowanych blach o wyroby cieńsze i szersze niż blachy wytwarzane według tradycyjnej technologii walcowania.

Słowa kluczowe: asymetryczny proces walcowania, wygięcie pasma, parametry energetyczne-siłowe procesu walcowania, sprężyste ugięcie walców roboczych, sprężyste ugięcie stojaka klatki wykańczającej

Article info

Received: 12.04.2018

Reviewed: 11.05.2018

Accepted: 28.09.2018

Authors' contribution

- (1) Concept, assumptions, methodology, substantive supervision

Abstract

The paper presents the results of research on the impact of the asymmetric rolling process on strip start bending, force-energy parameters (contact force, rolling torque and rolling power), elastic deflection of the working rolls and rolling mill stand. Theoretical research was carried out using the FORGE[®] computer program, based on the finite element method, for a strip of the initial height $h_0=10$ mm from S690QL steel. Simulations of the rolling process were performed for a symmetrical process, as well as for a process with one and two types of asymmetry. One type of asymmetry was obtained by varying the velocity of the working rolls (kinetic asymmetry), and the second type by differentiating the working roll diameters (geometric asymmetry). In the case of simultaneous use of two

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 34 325 07 84; e-mail: kawalek.anna@wip.pcz.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 34 325 07 84; e-mail: kawalek.anna@wip.pcz.pl

- (2) *Analysis and interpretation of results*
(3) *Numerical simulation testing, interpretation of results*

asymmetry types, the asymmetry coefficients were equal. The obtained theoretical results concerning reduction in the total contact force were compared with the results obtained for the finishing stand of an exemplary 3600 heavy plate rolling mill and on this basis a reduction in the elastic deflection of the working rolls and the rolling mill stand was determined. The research aimed to determine the effect of reducing the total contact force on the elastic deflection of the rolling stand elements. Due to the smaller elastic deflection of the rolls, smaller forces to bend the working rolls can be used. This will reduce the dimensional deviations both over the length and width of the finished plates. In addition, it will be possible to expand the range of rolled metal to thinner and wider products than those produced according to traditional rolling technology.

Keywords: *asymmetric rolling process, strip band, rolling process, force-energy parameters, elastic deflection of working rolls, elastic deflection of rolling mill stand*

1. WPROWADZENIE

Proces walcowania zarówno w warunkach przemysłowych, jak i w warunkach laboratoryjnych jest procesem asymetrycznym, ponieważ w rzeczywistości niemożliwe jest dotrzymanie wszystkich założeń procesu symetrycznego [1]. W wyniku tego rzeczywisty proces walcowania jest procesem z niekontrolowaną asymetrią, czego efektem jest powstanie wadliwych wyrobów gotowych. Najbardziej niekorzystnymi wadami są wady zakwalifikowane w walcowniach pod ogólną nazwą jako „nieprawidłowy kształt blachy” i występujące w postaci sierpowatości oraz falistości. Zastosowanie w procesie walcowania kontrolowanej asymetrii wpływa na poprawę jakości geometrii poprzecznej i wzdłużnej walcowanych blach poprzez obniżenie siły nacisku całkowitego, a tym samym mniejsze sprężyste ugięcie elementów klatki walcowniczej. Dodatkowo następuje również obniżenie mocy walcowania i uzyskuje się równomierny rozkład momentów walcowania pomiędzy obydwojma walcami roboczymi [1–3].

Proces asymetrycznego walcowania oprócz wyżej wymienionych zalet ma również wady. Do nich należy zaliczyć wyginanie się pasma po wyjściu z kotliny odkształcenia na skutek występowania zróżnicowanych warunków odkształcenia metalu od strony górnego i dolnego walca roboczego. Wartość krzywizny pasma zależy od wartości zastosowanego współczynnika asymetrii i pozostałych parametrów procesu walcowania [4, 5]. Zbyt duża krzywizna początku pasma może znacząco utrudniać lub wręcz uniemożliwiać dalsze prowadzenie procesu walcowania. Dlatego też zastosowanie technologii asymetrycznego walcowania w warunkach przemysłowych

1. INTRODUCTION

The process of rolling both in industrial conditions and in laboratory conditions is an asymmetric process because in reality it is impossible to maintain all the assumptions of the symmetrical process [1]. As a result, the actual rolling process is a process with uncontrolled asymmetry, resulting in defective finished products. The most unfavorable disadvantages are defects classified in rolling mills under the general name of “abnormal plate shape” and occurring in falciform and wavy forms. The use of controlled asymmetry in the rolling process improves the quality of the transverse and longitudinal geometry of the rolled plates by lowering the total contact force, and thus smaller elastic deflection of the rolling stand elements. In addition, a reduction in the rolling power and even distribution of the rolling torques between the two working rolls are also achieved [1–3].

The process of asymmetric rolling in addition to the above-mentioned advantages also has drawbacks. They include strip start bending after leaving the deformation gap due to the presence of varied conditions of metal strain on the upper and bottom side of the working roll. The strip curvature value depends on the value of the applied asymmetry coefficient and other parameters of the rolling process [4, 5]. Too large curvature of the strip start can greatly hinder or even prevent continuation of the rolling process. Therefore, the use of asymmetric rolling technology in industrial conditions requires prior execution of a series of theoretical tests to determine the accep-

wymaga uprzedniego wykonania szeregu badań teoretycznych w celu określenia dopuszczalnych zakresów zmian współczynników asymetrii dla zmiennych pozostałych parametrów procesu, przy których możliwe jest uzyskanie prostego pasma lub pasma z krzywizną na tyle niewielką, aby nie utrudniała prowadzenia procesu walcowania w kolejnych przepustach.

Proste pasmo przy jednoczesnym spadku nacisku metalu na walce, mocy walcowania i równomiernym rozkładzie momentów walcowania można uzyskać, stosując jednocześnie dwa rodzaje asymetrii [6–8].

2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu zastosowanych rodzajów asymetrii na wyginanie się początku pasma oraz na wartość parametrów energetyczno-siłowych procesu walcowania. Obniżenie wartości nacisku jednostkowego skutkuje mniejszym sprężystym ugięciem klatki walcowniczej i możliwością stosowania mniejszych sił przeginających walce robocze, a także uzyskaniem gotowej blachy o mniejszych odchyłkach wymiarowych, zarówno wzdłuż jej długości, jak i szerokości. Dzięki mniejszemu sprężystemu ugięciu walców można rozszerzyć asortyment walcowanych blach o wyroby cieńsze i szersze niż blachy wytwarzane według tradycyjnej technologii walcowania.

3. MATERIAŁ I METODYKA PRACY

W pracy przeprowadzono badania wpływu asymetrycznego procesu walcowania na wartość siły nacisku i pozostałych parametrów energetyczno-siłowych dla blachy ze stali w gatunku S690QL, której skład chemiczny pokazano w tab. 1, o wysokości początkowej $h_0=10$ mm w warunkach klatki wykańczającej walcowni 3600.

table ranges of changes in asymmetry coefficients for variables of other process parameters where it is possible to obtain a straight strip or strip with a small curvature so that it does not hinder conducting the rolling process in subsequent passes.

A straight strip can be obtained by applying two types of asymmetry with a simultaneous decrease in metal pressure on the rolls, rolling force and even distribution of rolling torques [6–8].

2. AIM AND SCOPE OF WORK

The aim of the conducted research was to determine the impact of applied asymmetry types on strip start bending and on the value of force-energy parameters of the rolling process. Lowering the unit pressure value results in less elastic deflection of the rolling stand and the possibility of using smaller forces that bend the working rolls, as well as obtaining a finished plate with smaller dimensional deviations, both along its length and width. Due to the smaller elastic deflection of the rolls, the range of rolled plates can be extended to include thinner and wider products than those produced according to traditional rolling technology.

3. MATERIAL AND METHODOLOGY OF RESEARCH

The study investigated the effect of the asymmetric rolling process on the contact force value and other force-energy parameters for S690QL steel plates, whose chemical composition is shown in Tab. 1, with the initial height $h_0=10$ mm in the condition of the 3600 rolling mill.

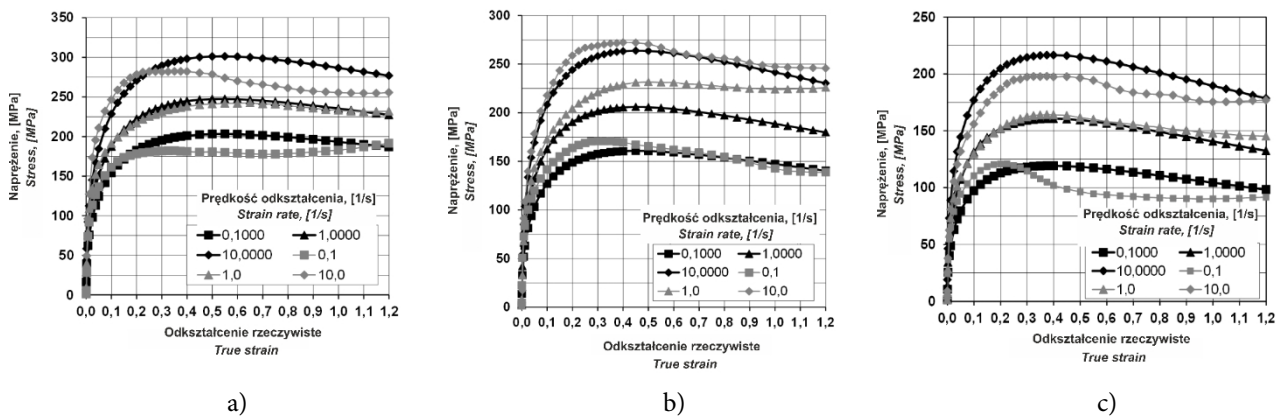
Tab. 1. Skład chemiczny stali wykorzystanej do badań [%]

Tab. 1. Chemical composition of steel used in the study [%]

	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Al	Cu	N	Si	P _{max}	S _{max}
S690QL	0,2	1,7	1,5	2,0	0,7	0,06	0,05	—	0,5	0,015	0,8	0,025	0,015

Od prawidłowego wyznaczenia własności stali w postaci wykresów naprężenie–odkształcenie, uwzględniających wpływ temperatury pasma i prędkości odkształcenia, zależy dokładność obliczeń numerycznych, w których wykorzystuje się metodę elementów skończonych. W celu wyznaczenia własności stali S690QL w postaci wykresów naprężenie–odkształcenie, uwzględniających wpływ temperatury pasma i prędkości odkształcenia przeprowadzono badania plastometryczne. Na ich podstawie opracowano wykresy zależności naprężenia od odkształcenia stali, które przedstawiono na rys. 1.

The accuracy of the numerical calculations in which the finite element method is used depends on correct determination of the steel properties in the form of stress-strain diagrams, taking into account the effect of the strip temperature and the strain rate. In order to determine the properties of the S690QL steel in the form of stress-strain diagrams, taking into account the influence of the strip temperature and the strain rate, plastometric tests were carried out. Sample graphs of stress changes as a function of strain are shown in Fig. 1.



Rys. 1. Zależności naprężenia od odkształcenia stali S690QL w temperaturze: a) 800°C, b) 900°C, c) 1000°C; linie szare – dane z badań plastometrycznych; linie czarne – wyniki po aproksymacji według równania (1), tab. 2

Fig. 1. Dependence of stress on strain of S690QL steel at temperature: a) 800°C, b) 900°C, c) 1000°C; gray lines – data from plastometric tests; black lines – results after approximation according to Equation (1), equation coefficients – Tab. 2

Dobrano współczynniki funkcji naprężenia uplastyczniającego oraz utworzono tabele z rzeczywistymi danymi prób plastometrycznych, które zostały wykorzystane w symulacjach komputerowych procesu walcowania. Do opisu wartości naprężenia uplastyczniającego σ_p w zależności od parametrów odkształcenia wykorzystano równanie Hansela-Spittela w stosowanym do symulacji numerycznych programie FORGE[®]2011 w postaci zależności:

$$\sigma_p = Ae^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} \varepsilon^{\frac{m_4}{\varepsilon}} (1 + \varepsilon)^{m_5 T} \varepsilon^{m_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{m_8 T} T^{m_9} \quad (1)$$

gdzie: σ_p – naprężenie uplastyczniające; T – temperatura pasma; ε – odkształcenie rzeczywiste; $\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia; $A, m_1 - m_9$ – wartości parametrów.

The yield stress function coefficients were determined and tables were created with real data from the plastometric tests, which were used in computer simulations of the rolling process. In the form of dependencies, the Hansel-Spittel equation in the FORGE[®]2011 program used for numerical simulations, was used to describe the value of yield stress σ_p depending on the strain parameters:

$$\sigma_p = Ae^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} \varepsilon^{\frac{m_4}{\varepsilon}} (1 + \varepsilon)^{m_5 T} \varepsilon^{m_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{m_8 T} T^{m_9} \quad (1)$$

where: σ_p – yield stress; T – band temperature; ε – true strain; $\dot{\varepsilon}$ – strain rate; $A, m_1 - m_9$ – parameter values.

Tab. 2. Wartości parametrów A i m_1 – m_9 stosowane do określenia wartości σ_p stali S690QL
 Tab. 2. Values of A and m_1 – m_9 parameters used to determine σ_p value of S690QL steel

Stal Steel	Wartości parametrów uzyskanych w wyniku aproksymacji równania (1) Parameter values obtained as a result of equation approximation (1)								
	A	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_7	m_8	m_9
S690QL	1,05893E-11	-0,007981	0,377910	-0,090853	-0,000178	-0,001316	-0,017303	0,000220	5,664424

Aby zmniejszyć różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi w wyniku aproksymacji a wynikami rzeczywistymi, dane opisujące krzywe płynięcia plastycznego badanych stali wprowadzono do programu komputerowego w postaci tabel, w których wartości naprężenia uplastyczniającego, podobnie jak w równaniu (1), zależą od wartości odkształcenia rzeczywistego, prędkości odkształcenia i temperatury odkształcanej stali.

Badania wykonano przy wykorzystaniu programu komputerowego FORGE[®] opartego na metodzie elementów skończonych. Do badań numerycznych przyjęto walce robocze o średnicy równej 970 mm i stałą prędkość obrotową dolnego walca roboczego równą $n=80$ obr/min. Do procesu walcowania wprowadzono dwa rodzaje asymetrii. Pierwszy rodzaj polegał na zróżnicowaniu prędkości obrotowych walców roboczych, przy czym prędkość obrotowa walca górnego była mniejsza od prędkości walca dolnego. Zakres zmian współczynnika prędkości obrotowej walców $a_v=v_d/v_g$ (gdzie: v_d , v_g – odpowiednio prędkość obrotowa dolnego i górnego walca) wynosił 1,05–1,20. Drugi rodzaj asymetrii uzyskano poprzez zmniejszenie średnicy dolnego walca roboczego $a_d=D_d/D_g$ (gdzie: D_d , D_g – odpowiednio średnica robocza dolnego i górnego walca) i współczynnik ten wynosił 1,05–1,20. Odkształcenia względne zmieniano w przedziale $\varepsilon=0,10$ – $0,30$. Symulacje prowadzono dla temperatury walcowania 850°C. Ponadto do symulacji przyjęto następujące dane wejściowe: temperaturę walców – 60°C, temperaturę otoczenia – 20°C, współczynnik tarcia – 0,3, czynnika tarcia – 0,7, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziem – $\alpha_{narz}=10000$ [W/m²K], współczynnik wymiany ciepła między materiałem a powietrzem – $\alpha_{pow}=10$ [W/m²K]. Program badań obejmował wpływ gniotu względnego ε i współczynników

In order to reduce the differences between the results obtained from the approximation and the real results, the data describing the plastic flow curves of the investigated steels were introduced into the computer program in the form of tables in which the yield stress values, similar to Equation (1), depend on the values of real strain, strain rate and temperature of the deformed steel.

The tests were performed for a flat strain state using the FORGE[®] computer program based on the finite element method. For the numerical tests, working rolls with a diameter equal to 970 mm and constant rotational velocity of the bottom working roll equal to $n=80$ rpm were accepted. One and two kinds of asymmetry were introduced to the rolling process. The first type consisted in diversification of the rotational velocities of the working rolls, whereby the rotational velocity of the upper roll was lower than the velocity of the bottom roll. The range of changes in the rotational velocity coefficient of the rolls $a_v=v_d/v_g$ (where: v_d , v_g – respectively the rotational velocity of the bottom and upper rolls) was 1.05–1.20. The second type of asymmetry was obtained by reducing the diameter of the bottom working roll $a_d=D_d/D_g$ (where: D_d , D_g – the working diameter of the bottom and upper roll respectively) and this coefficient was 1.05–1.20. The relative strains varied in the range of $\varepsilon=0.10$ – 0.30 . The simulations were run at the rolling temperature of 850°C. In addition, the following input data was adopted for the simulation: roll temperature – 60°C, ambient temperature – 20°C, coefficient of friction – 0.3, friction rate – 0.7, heat exchange coefficient between the material and the tool – $\alpha_{narz}=10000$ [W/m²K], the heat transfer coefficient between the material and the air – $\alpha_{pow}=100$ [W/m²K]. The research program included the effect of the relative rolling reduction ε , the velocity asymmetry

asymetrii prędkości a_v oraz asymetrii geometrycznej a_d na krzywiznę pasma ρ i parametry siłowo-energetyczne procesu walcowania.

coefficient a_v as well as the geometric asymmetry coefficient a_d on the strip curvature ρ as well as the force-energy parameters of the rolling process.

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W tab. 3 przedstawiono wyniki badań teoretycznych wpływu współczynników asymetrii na wartość krzywizny pasma i parametrów energetycznych procesu walcowania. W przypadku jednoczesnego zastosowania w procesie walcowania dwóch rodzajów asymetrii współczynniki asymetrii miały taką samą wartość.

4. ANALYSIS OF TEST RESULTS

The results of theoretical studies on the influence of the values of the asymmetry coefficients on the strip curvature value and energy parameters of the rolling process are shown in Tab. 3. When two types of asymmetry were used in the rolling process simultaneously, the asymmetry coefficients had the same value.

Tab. 3. Wyniki badań wpływu współczynników asymetrii kinetycznej i geometrycznej na wartość krzywizny pasma, całkowitej siły nacisku, momentu walcowania i mocy walcowania dla wsadu o wysokości początkowej $h_0=10$ mm; pa – oznacza dwa rodzaje asymetrii [9]

Tab. 3. Results of investigations on influence of kinetic and geometric asymmetry coefficients on strip curvature value, total contact force, rolling torque and rolling power for a charge of initial height $h_0=10$ mm; pa – means two kinds of asymmetry [9]

Gniot Rolling reduction ε	Współ. asymetrii Asymmetry coefficient a_v	Krzywizna pasma Strip curvature ρ , 1/m	Siła nacisku Contact force P, kN		Zmiana siły nacisku Change in contact force $\Delta P_i/P_i$, %	Średni moment walcowania Mean rolling torque kNm/mm		Moc Power P_w , kW
			Całkowita siła nacisku Total contact force P_c , kN			Średni moment całkowity Mean total torque M_1+M_2 , kNm/mm		
			Walec górny Upper roll	Walec dolny Bottom roll		Walec górny Upper roll	Walec dolny Bottom roll	
0,10	1,00	0	71,43	142,86	0	0,08	0,16	13,08
			-71,43			0,08		
	1,05	0,49	65,53	131,05	8,27	-0,30	0,76	13,57
			-65,52			0,45		
	1,05 pa	0	51,59	103,19	27,77	0,05	0,10	7,93
			-51,59			0,05		
	1,10	1,00	59,14	118,23	17,24	-0,50	1,31	16,70
			-59,10			0,81		
	1,10 pa	0	51,37	102,74	28,08	0,07	0,14	11,15
			-51,37			0,07		
1,15	1,19	56,64	113,24	20,74	-0,72	1,56	19,45	
		-56,60			0,84			
1,15 pa	0	42,34	84,68	40,73	0,06	0,10	7,79	
		-42,34			0,05			
1,20	1,22	56,11	112,16	21,49	-0,91	1,80	22,31	
		-56,06			0,89			
1,20 pa	0	63,34	126,68	11,33	0,07	0,13	9,73	
		-63,34			0,07			
0,15	1,00	0	106,09	212,17	0	0,14	0,28	23,49
			-106,09			0,14		
	1,05	-0,94	101,33	202,65	4,48	-0,18	0,64	23,45
			-101,33			0,46		
	1,05 pa	0	103,33	206,67	2,59	0,14	0,27	21,93
			-103,33			0,13		
	1,10	-0,41	87,54	175,07	17,49	-0,63	1,50	25,39
			-87,53			0,87		
	1,10 pa	0	77,10	154,19	27,33	0,11	0,20	15,73
			-77,10			0,09		

Gniot Rolling reduction ε	Współ. asymetrii Asymmetry coefficient a_v	Krzywizna pasma Strip curvature ρ , 1/m	Siła nacisku Contact force P , kN	Całkowita siła nacisku Total contact force P_c , kN	Zmiana siły nacisku Change in contact force $\Delta P_i/P_i$, %	Średni moment walcowania Mean rolling torque kNm/mm	Średni moment całkowity Mean total torque M_1+M_2 , kNm/mm	Moc Power P_w , kW
			Walec górny Upper roll			Walec dolny Bottom roll		
			Walec górny Upper roll			Walec dolny Bottom roll		
	1,15	1,19	78,87	157,71	25,67	-0,72	1,65	29,43
			-78,84			0,93		
	1,15 pa	0	73,88	147,74	30,37	0,09	0,17	12,75
			-73,87			0,08		
	1,20	1,37	51,66	103,29	51,32	-0,93	2,00	32,26
			-51,63			1,07		
	1,20 pa	-0,28	95,52	191,05	9,96	0,12	0,24	17,93
			-95,52			0,12		
0,20	1,00	0	142,94	285,87	0	0,22	0,44	36,38
			-142,94			0,22		
	1,05	-0,74	139,72	279,43	2,25	-0,07	0,58	35,98
			-139,71			0,50		
	1,05 pa	0	139,41	278,82	2,47	0,21	0,42	34,04
			-139,41			0,21		
	1,10	-0,95	126,29	252,59	11,64	-0,50	1,41	40,21
			-126,30			0,90		
	1,10 pa	0	135,43	270,85	5,26	0,20	0,40	31,74
			-135,42			0,20		
	1,15	0,04	107,85	215,70	24,55	-0,94	2,22	40,41
			-107,85			1,28		
	1,15 pa	0	132,15	264,29	7,55	0,20	0,39	29,77
			-132,14			0,19		
	1,20	1,49	97,18	184,34	32,02	-1,14	2,58	44,58
			-97,16			1,44		
1,20 pa	-0,28	127,76	255,53	10,62	0,19	0,37	27,53	
		-127,77			0,18			
0,25	1,00	0	182,47	364,94	0	0,31	0,61	51,40
			-182,47			0,31		
	1,05	-0,41	178,78	357,56	2,02	0,04	0,61	50,32
			-178,78			0,57		
	1,05 pa	0	170,54	341,08	6,54	0,30	0,59	47,82
			-170,54			0,29		
	1,10	-0,82	168,51	337,02	7,65	-0,57	1,52	51,52
			-168,51			0,95		
	1,10 pa	0	174,76	349,52	4,23	0,31	0,58	45,80
			-174,76			0,28		
	1,15	-0,54	147,87	295,74	18,96	-0,84	2,11	54,25
			-147,87			1,27		
	1,15 pa	0	170,22	340,44	6,71	0,30	0,56	42,89
			-170,21			0,26		
	1,20	0,71	123,70	247,41	32,2	-1,19	2,60	56,75
			-123,71			1,41		
1,20 pa	-0,25	165,42	330,83	9,35	0,29	0,54	39,80	
		-165,41			0,25			
0,30	1,00	0	217,68	435,37	0	0,40	0,81	66,94
			-217,68			0,40		
	1,05	0	214,64	429,27	1,40	0,18	0,80	65,53
			-214,63			0,63		
	1,05 pa	0	211,19	422,40	2,98	0,39	0,78	62,65
			-211,21			0,39		

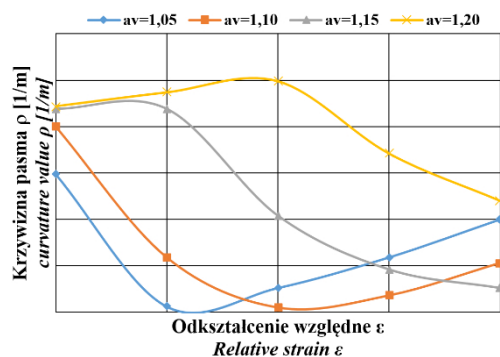
Gniot Rolling reduction ε	Współ. asymetrii Asymmetry coefficient a_v	Krzywizna pasma Strip curvature ρ , 1/m	Siła nacisku Contact force P , kN	Całkowita siła nacisku Total contact force P_c , kN	Zmiana siły nacisku Change in contact force $\Delta P_i/P_i$, %	Średni moment walcowania Mean rolling torque kNm/mm	Średni moment całkowity Mean total torque M_1+M_2 , kNm/mm	Moc Power P_w , kW
			Walec górny Upper roll			Walec górny Upper roll		
			Walec dolny Bottom roll			Walec górny Bottom roll		
1,10	-0,47		209,04	418,09	3,97	-0,19	1,17	66,60
			-209,05			0,98		
1,10 pa	0		209,43	418,84	3,80	0,40	0,76	59,49
			-209,41			0,36		
1,15	-0,74		190,89	381,80	12,30	-0,69	2,10	69,33
			-190,91			1,42		
1,15 pa	0		199,28	398,55	8,46	0,38	0,72	54,64
			-199,27			0,33		
1,20	0,20		165,27	330,53	24,08	-1,11	2,88	72,77
			-165,26			0,76		
1,20 pa	-0,24		193,90	387,81	10,92	0,38	0,69	50,75
			-193,90			0,31		

W tab. 3 przedstawiono wyniki badań numerycznych wpływu wartości zastosowanych współczynników asymetrii prędkości obrotowej a_v i średnic walców roboczych a_d oraz gniotu względnego ε na wartość krzywizny pasma ρ , całkowitej siły nacisku, momentu walcowania i mocy walcowania dla wsadu o wysokości początkowej $h_0=10$ mm ($h_0/D=0,010$) ze stali S690QL.

Na podstawie zamieszczonych w tab. 3 wyników badań stwierdzono, że proste pasmo lub z niewielką krzywizną uzyskano po walcowaniu z dwoma rodzajami asymetrii (dla największych wartości współczynników asymetrii $a_v=a_d=1,20$ pasmo wyginało się w stronę dolnego walca), oraz dla następujących przypadków z jednym rodzajem asymetrii, gdy: $a_v=1,05$ i $\varepsilon=0,30$, $a_v=1,15$ i $\varepsilon=0,20$ oraz $a_v=1,20$ i $\varepsilon=0,30$.

The results of numerical studies on the influence of the values of the rotational velocity asymmetry coefficient a_v , the diameter of the working rolls coefficient a_d and relative rolling reduction ε used on the strip curvature value ρ , total contact force, rolling torque and rolling power for the charge of initial height $h_0=10$ mm ($h_0/D=0.010$) from S690QL steel are shown in Tab. 3.

Based on the test results presented in Tab. 3 and Fig. 2, it was found that a straight strip or one with a small curvature can be obtained after rolling with two types of asymmetry (for the largest asymmetry values $a_v=a_d=1.20$ the strip bends towards the bottom roll) and for the following cases rolling with one kind of asymmetry, when: $a_v=1.05$ and $\varepsilon=0.30$, $a_v=1.15$ and $\varepsilon=0.20$ and $a_v=1.20$ and $\varepsilon=0.30$.



Rys. 2. Wpływ odkształcenia względnego ε i stosowanych współczynników asymetrii a_v na wartość krzywizny pasma ρ przy stałej wartości współczynnika średnicy walca $h_0/D=0,010$; wysokość początkowa wsadu $h_0=10$ mm

Fig. 2. Effect of relative strain ε and applied asymmetry coefficients a_v on strip curvature value ρ with constant value of roll diameter coefficient $h_0/D=0.010$; initial height of charge $h_0=10$ mm

Z danych przedstawionych na rys. 2 i tab. 3 wynika, że w wyniku zastosowania w procesie walcowania jednego rodzaju asymetrii otrzymano wygięty początek pasma, przy czym pasmo wyginało się zarówno w stronę dolnego, jak i górnego walca (za wyjątkiem przypadku, gdy $\varepsilon=0,10$). Przy małych wartościach współczynników asymetrii a_v pasmo wyginało się w stronę dolnego walca, natomiast ze wzrostem wartości a_v zmieniał się kierunek wygięcia w stronę górnego walca. Podczas walcowania z odkształceniem względnym $\varepsilon=0,10$, niezależnie od wartości zastosowanego współczynnika asymetrii a_v , pasmo wyginało się w stronę górnego walca. Wartość krzywizny pasma ρ wzrastała wraz ze wzrostem wartości a_v . Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wprowadzenie do procesu walcowania dwóch rodzajów asymetrii pozwoliło otrzymać proste pasmo lub pasmo o krzywiznie dopuszczalnej w warunkach przemysłowych, występującej tylko po zadaniu największych wartości gniołów ε i największych wartości współczynników asymetrii prędkości obrotowej i średnic walców roboczych. Wyginanie się początku pasma po procesie walcowania jest zjawiskiem niekorzystnym, gdyż początek pasma posiada trwale zdeformowany falisty kształt (niemożliwy do usunięcia), a ponadto w przypadku wyginania się pasma w stronę dolnego walca szybkemu zużyciu ulega osprzęt walcarki i rolki samotoku roboczego.

W tab. 3 zamieszczono również wyniki badań nad wpływem zastosowanych współczynników asymetrii kinetycznej i geometrycznej zmiennych w zakresie $a_v=a_d=1,05-1,20$ i gniołów $\varepsilon=0,10-0,30$, dla badanego wsadu o wysokości początkowej $h_0=10$ mm ($h_0/D=0,01$), na wartość całkowitej siły nacisku P_c .

Na podstawie analizy wyników badań można stwierdzić, że dla wszystkich przedstawionych przypadków procesu walcowania zarówno z jednym, jak i dwoma rodzajami asymetrii uzyskano spadki nacisku. Spadki te były różne i wynosiły od kilku do kilkudziesięciu procent. Spadek nacisku (ponad 30%) uzyskano podczas procesu walcowania pasma z jednym rodzajem asymetrii w zakresie stosowanych gniołów z przedziału $\varepsilon=0,15-0,25$ i największego współczynnika asymetrii $a_v=1,20$. Natomiast największe obniżenie

As a result of using one kind of asymmetry in the rolling process, strip start bending was obtained, with the strip bending both towards the bottom and upper roll (except when $\varepsilon=0,10$). At small values of a_v asymmetry coefficients, the strip bent towards the bottom roll, while with an increase in the a_v value the bending direction changed towards the upper roll. During rolling with relative strain $\varepsilon=0,10$, regardless of the value of the applied asymmetry coefficient a_v , the band bends towards the upper roll. The strip curvature value ρ increased with an increase in the a_v value. On the basis of the conducted research, it can be concluded that introducing two types of asymmetry into the rolling process allowed a straight strip or strip curvature acceptable under industrial conditions to be obtained, occurring only after setting the highest rolling reduction value ε and highest values of the rotational velocity asymmetry and working roll diameter asymmetry coefficients. Strip start bending after the rolling process is an unfavorable phenomenon, since the strip start has a permanently deformed wavy shape, impossible to remove, and in the event of the strip bending towards the bottom roll, the mill equipment and rolls of the working stand are quickly worn out.

Tab. 3 also contains the results of research on the impact of the applied kinetic asymmetry and geometric asymmetry variables in the range $a_v=a_d=1,05-1,20$ and rolling reduction $\varepsilon=0,10-0,30$, for the tested charge of the initial height $h_0=10$ mm ($h_0/D=0,01$), for the total contact force value P_c .

Based on the analysis of the test results, it can be concluded that for all the cases illustrated in both the rolling process with one or two types of asymmetry, decreases in the pressure were obtained. The declines were different and ranged from several to several dozen percent. A pressure drop (over 30%) was obtained during the strip rolling process with one kind of asymmetry in the range of applied rolling reductions from the range $\varepsilon=0,15-0,25$ and the highest asymmetry coefficient $a_v=1,20$. However, the greatest reduction in the pressure values in the rolling process

wartości nacisków w procesie walcowania z dwoma rodzajami asymetrii otrzymano dla gniotów w zakresie $\varepsilon=0,10-0,15$.

Następnie dokonano analizy wartości momentów na górnym i dolnym walcu dla badanego zakresu wartości odkształceń względnych $\varepsilon=0,10-0,30$ i współczynników asymetrii kinetycznej z zakresu $a_v=1,05-1,20$.

Na podstawie uzyskanych wyników badań (tab. 3) stwierdzono, że wprowadzenie asymetrycznego procesu walcowania poprzez zróżnicowanie prędkości obrotowych walców roboczych ma duży wpływ na wartość momentów walcowania na górnym (M_g) i dolnym (M_d) walcu i wywołuje wzrost sumarycznego momentu walcowania wraz ze wzrostem wartości współczynnika asymetrii. W zależności od wartości zastosowanej asymetrii (a_v) i pozostałych parametrów procesu walcowania zachodzi niejednakowe rozdzielanie momentów między walcem o mniejszej i większej prędkości obrotowej. Oba momenty mogą być dodatnie, ale o różnej wartości; moment na walcu z mniejszą średnicą może być ujemny lub równy zero – walec ten staje się walcem napędzanym. Momenty walcowania na górnym walcu były ujemne, a ich wartości bezwzględne wzrastały wraz ze wzrostem zastosowanego współczynnika a_v .

Wzrost wartości momentów walcowania i nierównomierny ich rozkład należy zaliczyć do ujemnych cech procesu asymetrycznego walcowania.

Po wprowadzeniu do procesu walcowania dwóch rodzajów asymetrii (kinetycznej i geometrycznej) zaobserwowano, że wartości momentów walcowania są nieco niższe niż w przypadku walcowania symetrycznego i rozkładają się one równomiernie na poszczególne walce.

W tab. 3 przedstawiono także wyniki badań wpływu jednego i dwóch rodzajów asymetrii kinetycznej i geometrycznej o współczynnikach zmiennych w zakresie $a_v=a_d=1,05-1,20$ i przy odkształceniach względnych z przedziału $\varepsilon=0,10-0,30$ na zmiany wartości mocy walcowania. Z danych przedstawionych w tab. 3 wynika, że po wprowadzeniu asymetrycznego procesu walcowania drogą zróżnicowania prędkości obrotowych walców roboczych nastąpił znaczny wzrost mocy walcowania dla całego badanego zakresu

with two types of asymmetry was obtained for rolling reductions in the range of $\varepsilon=0,10-0,15$.

Next, the torque values on the upper and bottom roll for the tested range of relative strain values $\varepsilon=0,10-0,30$ and kinetic asymmetry coefficients from the range of $a_v=1,05-1,20$ were analyzed.

On the basis of the obtained test results (Tab. 3) it was found that conducting the asymmetric rolling process by varying the rotational velocities of the working rolls has a great effect on the rolling torque on the upper (M_g) and bottom (M_d) rolls and causes an increase in the total rolling torque, together with an increase in the asymmetry value. Depending on the applied asymmetry value (a_v) and the remaining parameters of the rolling process, there is an uneven separation of the torques between the rolls with lower and higher velocity. Both torques can be positive, but with different values; the torque on the roll with the smaller diameter can be negative or equal to zero – this roll becomes a driven roll. The rolling torques on the upper roll were negative and their absolute values increased with an increasing a_v coefficient.

The increase in the values of rolling torques and their uneven distribution should be considered as negative features of the asymmetric rolling process.

After introducing two types of asymmetry into the rolling process (kinetic and geometric), it was observed that the rolling torque values are slightly lower than in the case of symmetric rolling and they evenly distribute on individual rolls.

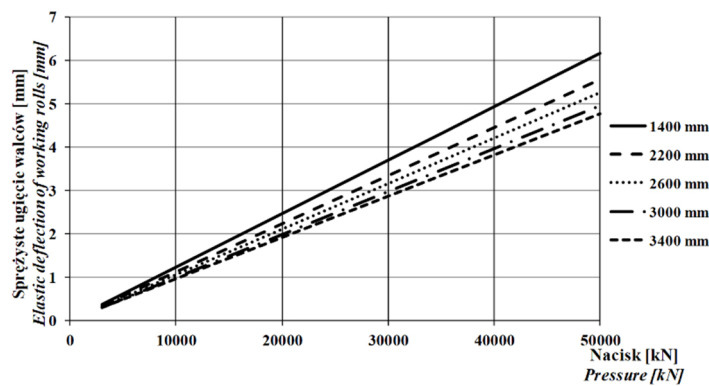
Tab. 3 also presents the results of investigations on the impact of one and two kinds of kinetic and geometric asymmetry with variable coefficients in the range $a_v=a_d=1,05-1,20$ and with relative strains from the range $\varepsilon=0,10-0,30$ on changes in the rolling power value. The data presented in Tab. 3 shows that after carrying out the asymmetric rolling process by varying the rotational velocities of the working rolls, the rolling power was significantly increased, for the entire tested range of relative strain $\varepsilon=0,10-0,30$.

odkształceń względnych $\varepsilon=0,10-0,30$. Po jednoczesnym zastosowaniu dwóch rodzajów asymetrii nastąpił spadek mocy walcowania – dla największych analizowanych współczynników asymetrii spadek ten wynosił około 25%.

W pracy przedstawiono także wpływ zastosowania asymetrycznego procesu walcowania na zmiany sprężystego ugięcia walców roboczych i stojaka klatki wykańczającej. Sprężyste ugięcie walców roboczych dla różnych szerokości walcowanego pasma w zakresie od 1400–3400 mm i sprężyste ugięcie stojaka klatki wykańczającej przykładowej walcowni blach grubych 3600 pokazano na rys. 3 i 4.

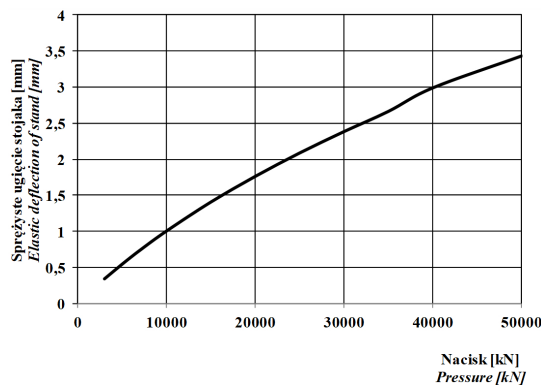
After simultaneous application of two kinds of asymmetry there was a decrease in the rolling power – for the highest analyzed asymmetry coefficients, the decrease was about 25%.

The paper also presents the effect of applying the asymmetric rolling process on changes in the elastic deflection of the working rolls and the rolling mill stand. The elastic deflection of the working rolls for different widths of the rolled strip in the range from 1400–3400 mm and elastic deflection of the rolling mill stand of the exemplary heavy plate rolling mill 3600, is shown in Fig. 3 and 4.



Rys. 3. Sprężyste ugięcie walców roboczych klatki wykańczającej przykładowej walcowni 3600 dla różnych szerokości walcowanego pasma

Fig. 3. Elastic deflection of working rolls of finishing stand of example rolling mill 3600 for different widths of rolled strip



Rys. 4. Sprężyste ugięcie stojaka klatki wykańczającej przykładowej walcowni blach grubych 3600

Fig. 4. Elastic deflection of rolling mill stand of exemplary heavy plate rolling mill 3600

W tab. 4 zamieszczono wyniki badań wpływu współczynników asymetrii (jednego i dwóch rodzajów) na wartość krzywizny pasma, całkowitej siły nacisku, sprężystego ugięcia walców roboczych i stojaka klatki walcowniczej, dla których spadek nacisków wynosił powyżej 20%.

Tab. 4 presents the results of research on the impact of asymmetry coefficients (one and two kinds) on the value of strip curvature, total contact force, elastic deflection of working rolls and rolling stand, for which the drop in pressure exceeded 20%.

Tab. 4. Wyniki badań wpływu współczynników asymetrii na wartość krzywizny pasma, całkowitej siły nacisku, sprężystego ugięcia walców roboczych i stojaka klatki walcowniczej dla wsadu o wysokości początkowej $h_0=10$ mm i szerokości 1400 mm; pa – dwa rodzaje asymetrii

Tab. 4. Results of investigations on impact of asymmetry coefficients on strip curvature value, total contact force, elastic deflection of working rolls and rolling stand for a charge of initial height $h_0=10$ mm and width 1400 mm; pa – two types of asymmetry

Gniot Rolling reduction ε	Współ. asymetrii Asymmetry coefficient a_v	Krzywizna pasma Strip curvature ρ , 1/m	Całkowita siła nacisku Total contact force P_c , kN	Zmiana siły nacisku Change in contact force $\Delta P_i/P_i$, %	Sprężyste ugięcie walców Roll elastic deflection mm	Sprężyste ugięcie stojaka Rolling stand elastic deflection mm	Sumaryczne sprężyste ugięcie walców i stojaka Summary elastic deflection of rolls and rolling stand mm
0,10	1,00	0	20000	0	2,46	1,76	4,22
	1,05 pa	0	14447	27,77	1,78	1,36	3,14
	1,10 pa	0	14384	28,08	1,77	1,35	3,12
	1,15	1,19	15854	20,74	1,95	1,47	3,42
	1,15 pa	0	11855	40,73	1,46	1,15	2,61
	1,20	1,22	15702	21,49	1,93	1,46	3,39
0,15	1,00	0	29700	0	3,66	2,37	6,03
	1,10 pa	0	21587	27,33	2,65	1,86	4,51
	1,15	1,19	22079	25,67	2,71	1,90	4,61
	1,15 pa	0	20684	30,37	2,54	1,81	4,35
	1,20	1,37	14461	51,32	1,78	1,36	3,14
0,20	1,00	0	40022	0	4,92	2,99	7,91
	1,15	0,04	30198	24,55	3,71	2,40	6,11
	1,20	1,49	25808	32,02	3,17	2,13	5,30
0,25	1,00	0	51092	0	6,28	3,48	9,76
	1,20	0,71	34637	32,2	4,26	2,65	6,91
0,30	1,00	0	60951	0	7,44	3,88	11,32
	1,20	0,20	46274	24,08	5,69	3,27	8,96

Z danych przedstawionych w tab. 4 wynika, że dla małych gniotów $\varepsilon=0,10-0,15$ mniejsze sprężyste ugięcia uzyskano podczas procesu walcowania z zastosowaniem dwóch rodzajów asymetrii, natomiast dla gniotów z zakresu $\varepsilon=0,20-0,30$ mniejsze ugięcie otrzymano podczas procesu walcowania z jednym rodzajem asymetrii. Pomimo że dla większych gniotów uzyskano lepsze wyniki dla procesu z jednym rodzajem, nie zawsze proces ten można przeprowadzić w warunkach przemysłowych ze względu na zbyt duże wygięcie początku pasma, co można zaobserwować dla niektórych przypadków (tab. 4).

Mniejsze ugięcie sprężyste walców roboczych wpływa na zmniejszenie wartości sił przeginających walce, co z kolei skutkuje mniejszym zużyciem się łożysk walców i wydłużeniem czasu ich eksploatacji. Dodatkowo podczas procesu wal-

From the data presented in Tab. 4, it can be seen that for small rolling reductions $\varepsilon=0.10-0.15$, smaller elastic deflections were obtained during the rolling process with the use of two asymmetry types, whereas for rolling reductions from the range $\varepsilon=0.20-0.30$ lower deflection was obtained during the rolling process with one kind of asymmetry. Although for higher rolling reductions there were better results for the one type process, this process cannot always be carried out in industrial conditions due to too great strip start bending, which can be observed in some cases (Tab. 4).

The smaller elastic deflection of the working rolls reduces the value of the forces that bend the rolls, which in turn results in less wear of the roll bearings and longer service life. In addition, greater rolling reductions can be used during the

cowania można stosować większe gnioty, co wpływa na poprawę własności plastycznych gotowych blach. Obniżenie ugięcia walców roboczych wpływa również na poprawę kształtu wyrobów gotowych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań stwierdzono, że obniżenie sprężystego ugięcia walców i stojaka na skutek wprowadzenia asymetrii do procesu walcowania pozwoli na rozszerzenie asortymentu walcowanych blach poprzez zwiększenie szerokości lub obniżenie ich wysokości końcowej.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- wprowadzenie jednego rodzaju asymetrii do procesu walcowania wpływa na obniżenie nacisku metalu na walce, ale jednocześnie w większości przypadków powoduje wyginanie się początku pasma, co jest zjawiskiem niekorzystnym, gdyż pasmo posiada trwale zdeformowany kształt (falisty), niemożliwy do usunięcia, a ponadto, jeśli pasmo wygina się w stronę dolnego walca szybkiemu zużyciu ulegają osprzęt walcarki i rolki samotoku roboczego;
- zastosowanie jednego rodzaju asymetrii wpływa na wzrost wartości momentu nominalnego i nierównomierny rozkład momentów walcowania pomiędzy walce robocze, co może doprowadzić do przekroczenia wartości dopuszczalnych; wzrasta też znacznie moc walcowania;
- poprzez wprowadzenie do procesu walcowania dwóch rodzajów asymetrii uzyskano proste pasmo dla wszystkich badanych w pracy przypadków, a także stwierdzono obniżenie wartości siły nacisku metalu na walce; rozkład momentów walcowania pomiędzy walce robocze był równomierny i zmniejszyła się wartość mocy walcowania;
- podczas procesu walcowania z jednym i dwoma rodzajami asymetrii zaobserwowano obniżenie sprężystego ugięcia walców i stojaka klatki roboczej, co wpływa na poprawę kształtu gotowych blach i umożliwi rozszerzenie asortymentu walcowanych wyrobów.

rolling process, which improves the plastic properties of the finished plates. Reducing the deflection of the working rolls also improves the shape of the finished products.

Based on the analysis of the test results, it was found that lowering the elastic deflection of the rolls and the stand, due to introducing asymmetry into the rolling process, will allow the range of rolled plates to be widened by increasing the width or lowering their final height.

5. CONCLUSIONS

On the basis of the conducted research, it can be stated that:

- *introducing one kind of asymmetry to the rolling process reduces the metal pressure on the rolls, but at the same time in most cases causes strip start bending, which is an unfavorable phenomenon because the strip has a permanently deformed shape (undulating), impossible to remove, and moreover, if the strip bends in the direction of the bottom roll, the mill equipment and working stand rolls become quickly worn;*
- *applying one kind of asymmetry affects an increase in nominal torque and uneven distribution of rolling torques between the working rolls, which may lead to exceeding the limit values; the rolling power is also significantly increased;*
- *by introducing two types of asymmetry into the rolling process, a straight band was obtained for all the cases tested in the study, as well as a decrease in the value of the metal contact force on the rolls; the distribution of rolling torques between the working rolls was even and the rolling power value decreased;*
- *during the rolling process with one and two types of asymmetry, a decrease in the elastic deflection of the rolls and the working stand has been observed, which improves the shape of the finished plates and will allow the range of rolled products to be widened.*

PODZIĘKOWANIA

Praca zrealizowana w ramach badań statutowych prowadzonych w Instytucie Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa Politechniki Częstochowskiej.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was conducted as a part of statutory research in the Institute of Plastic Working and Safety Engineering of Czestochowa University of Technology.

LITERATURA

- [1] Nikolaev V.A., A.A. Vasil'ev. 2013. „Izgib polosy i drugie parametry nesimmetrichnoj prokatki”. *Stal* 7: 42–49.
- [2] Dyja H., W. Sałganik, A. Piesin, A. Kawałek. 2008. *Asymetryczne walcowanie blach i taśm – teoria, technologia i nowe rozwiązania*. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [3] Kawałek A.: *Asymetryczne walcowanie blach grubych w walcowni dwuklatkowej*, Wyd. WIPMiFS PCz., Częstochowa, 2011.
- [4] Kawałek A. 2002. „The theoretical and experimental analysis of the effect of asymmetrical rolling on the value of unit pressure”. W *Conference on Achievements In Mechanical and Materials Engineering Gliwice, Poland, 2002*.
- [5] Yan, Tao, Qin, Na, Zhao, Shuo, et al. 2017. „Deformation analysis of asymmetric break-down rolling of hollow steel”. *World Journal of Engineering* 14 (6).
- [6] Nikolaev V.A. 2007. „Izvestija vysshikhuchebnykh zavedenij”. *Chernaja metallurgija* 3: 20–23.
- [7] Piesin A.M., A. Kawałek, P. Szyński, D.O. Pustovojtov. 2013. „Ispol'zovanie dvuh faktorov asimmetrii pri tolstolistovoj prokatke”. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehniceskogo Universiteta im. G. I. Nosova* 4: 50–51.
- [8] Shiński P., A. Kawałek, H. Dyja, M. Knapinski. 2014. Analiz izmenenija sily davlenija i izgiba polosy pri prokatke tolstykh listov v chistovoj kleti, 281–285. *Innovacionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii. Sb. nauch. trudov*. Ekaterinburg: Izdatelstvo ural'skogo universiteta.
- [9] Kawałek A. 2016. *Teoria i technologia asymetrycznego procesu walcowania wyrobów płaskich*. Seria Monografie nr 54. Częstochowa: Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Politechniki Częstochowskiej.

REFERENCES

- [1] Nikolaev V.A., A.A. Vasil'ev. 2013. „Izgib polosy i drugie parametry nesimmetrichnoj prokatki”. *Stal* 7: 42–49.
- [2] Dyja H., W. Sałganik, A. Piesin, A. Kawałek. 2008. *Asymetryczne walcowanie blach i taśm – teoria, technologia i nowe rozwiązania*. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [3] Kawałek A.: *Asymetryczne walcowanie blach grubych w walcowni dwuklatkowej*, Wyd. WIPMiFS PCz., Częstochowa, 2011.
- [4] Kawałek A. 2002. „The theoretical and experimental analysis of the effect of asymmetrical rolling on the value of unit pressure”. W *Conference on Achievements In Mechanical and Materials Engineering Gliwice, Poland, 2002*.
- [5] Yan, Tao, Qin, Na, Zhao, Shuo, et al. 2017. „Deformation analysis of asymmetric break-down rolling of hollow steel”. *World Journal of Engineering* 14 (6).
- [6] Nikolaev V.A. 2007. „Izvestija vysshikhuchebnykh zavedenij”. *Chernaja metallurgija* 3: 20–23.
- [7] Piesin A.M., A. Kawałek, P. Szyński, D.O. Pustovojtov. 2013. „Ispol'zovanie dvuh faktorov asimmetrii pri tolstolistovoj prokatke”. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehniceskogo Universiteta im. G. I. Nosova* 4: 50–51.
- [8] Shiński P., A. Kawałek, H. Dyja, M. Knapinski. 2014. Analiz izmenenija sily davlenija i izgiba polosy pri prokatke tolstykh listov v chistovoj kleti, 281–285. *Innovacionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii. Sb. nauch. trudov*. Ekaterinburg: Izdatelstvo ural'skogo universiteta.
- [9] Kawałek A. 2016. *Teoria i technologia asymetrycznego procesu walcowania wyrobów płaskich*. Seria Monografie nr 54. Częstochowa: Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Politechniki Częstochowskiej.