



Wpływ walcowania asymetrycznego na zimno na strukturę i właściwości mechaniczne taśmy ze stali S235

Effect of cold asymmetric rolling on the structure and mechanical properties of S235 steel strip

(1) Maciej Rozmysłowicz*, (2) Michał Pieszak

Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 20.04.2017

Recenzja: 7.08.2017

Akceptacja: 29.09.2017

Wkład autorów

- (1) Autor koncepcji i założeń walcowania asymetrycznego, wykonanie badań walcowania badań walcowania asymetrycznego
- (2) Autor koncepcji i założeń walcowania asymetrycznego, wykonanie badań walcowania badań walcowania asymetrycznego

Streszczenie

W artykule opisano badania walcowania na zimno metodą ASR (*asymmetric rolling* – walcowanie asymetryczne) stali konstrukcyjnej S235 stosowanej w budowie maszyn. Płaskowniki ze stali S235 znajdują zastosowanie m.in. przy produkcji krat pomostowych i piorunochronów. Przeprowadzone badania są kontynuacją i poszerzeniem dotychczasowych prac nad procesem walcowania i mają na celu określenie możliwości metody walcowania asymetrycznego stali konstrukcyjnej na zimno, w tym: zbadanie właściwości mechanicznych po walcowaniu oraz określenie wpływu walcowania asymetrycznego na siły i czas trwania procesu walcowania. Badania były prowadzone na walcierce laboratoryjnej typu DUO, która wraz ze zintegrowanym systemem sterowania umożliwia walcowanie taśm z różnymi prędkościami obrotowymi walców. Natomiast zamontowany układ czujników tensometrycznych pozwala na pomiar sił walcowania w czasie rzeczywistym. Badano proces walcowania asymetrycznego dla stosunków prędkości walców wynoszących od 1:1 do 3:1. Nie stwierdzono różnic we właściwościach mechanicznych pomiędzy taśmami walcowanymi metodą klasyczną, tj. z równymi prędkościami obrotowymi walców, a taśmami uzyskiwanymi metodą walcowania asymetrycznego. Nie stwierdzono wyraźnych zmian w strukturze badanych próbek przewalcowanych metodą ASR w stosunku do próbek przewalcowanych z równymi prędkościami walców. Stwierdzono znaczny spadek sił przy zastosowaniu walcowania asymetrycznego zależny od proporcji prędkości walców. Udało się uzyskać obniżenie sił o 33% przy walcowaniu ze stosunkiem 3:1 w odniesieniu do walcowania z równymi prędkościami obrotowymi walców.

Słowa kluczowe: walcowanie, walcowanie asymetryczne, siły walcowania, walcarka

Article info

Received: 20.04.2017

Reviewed: 7.08.2017

Accepted: 29.09.2017

Authors' contribution

- (1) Concept and assumptions of asymmetric rolling, asymmetric rolling testing
- (2) Concept and assumptions of asymmetric rolling, asymmetric rolling testing

Abstract

This paper describes ASR (cold asymmetric rolling) tests of S235 structural steel used for machine building. Steel S235 flat bars are used for production of deck grating and lightning rods. The research is a continuation and development of the existing work on the rolling process and its purpose is to determine a possibility of cold asymmetric rolling of structural steel, including examination of mechanical properties after rolling and determination of influence of asymmetric rolling on rolling process forces and duration. The tests were carried out using a laboratory DUO rolling mill and an integrated control system designed for strip rolling with different roll speeds. A strain gauge system was used for real time measurement of rolling forces. The asymmetric rolling process testing was carried out for roll speed ratios ranging from 1:1 to 3:1. No differences were found in mechanical properties between strips rolled using conventional methods, i.e. with equal rotational speeds of the rolls and strips obtained by asymmetric rolling. There were no significant changes in the structure of the test samples rolled asymmetrically compared to samples rolled at equal roll speeds. A significant decrease in the forces was found when

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: maciej.rozmyslowicz@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; fax: +48 61 657 07 21; e-mail: maciej.rozmyslowicz@inop.poznan.pl

asymmetric rolling was used, depending on the roll speed ratio. A 33% reduction in forces was achieved when rolling with a 3:1 ratio for equal roll speed rolling.

Keywords: *rolling, asymmetric rolling, rolling forces, rolling mill*

1. WPROWADZENIE I CEL BADAŃ

Technologie wykonywania płaskowników metodą walcowania na zimno są nieustannie rozwijane. Jedną z takich metod walcowania na zimno jest walcowanie asymetryczne (*asymmetric rolling* – ASR). W literaturze [1] walcowanie asymetryczne opisywane jest jako modyfikacja procesu walcowania blach i taśm w skali przemysłowej. Metoda polega na zastosowaniu walców roboczych o różnych średnicach, zastosowaniu różnych prędkości obrotowych walców lub zróżnicowaniu warunków tarcia dla obu walców. Badano wpływ walcowania z różnymi prędkościami walców, zarówno na strukturę oraz właściwości mechaniczne walcowanej taśmy, jak i na siły występujące podczas walcowania. Z przeprowadzonych w pracy [2] badań wynika, że walcowanie asymetryczne umożliwia zmniejszenie sił występujących podczas procesu, co zwiększa trwałość elementów walcarki, lub umożliwia stosowanie większych gniotów w jednym przepuście.

W literaturze można znaleźć przede wszystkim informacje dotyczące prób walcowania asymetrycznego na zimno materiałów nieżelaznych takich, jak: stopy miedzi [3], aluminium [1, 2, 4, 5], niklu [2, 4] czy magnezu [6, 7]. W artykule [1] opisano proces walcowania asymetrycznego czystego technicznie aluminium. Stwierdzono znaczny wzrost wartości granicy plastyczności po walcowaniu asymetrycznym w stosunku do materiału przed walcowaniem (od około 100 MPa do około 250 MPa).

Badania walcowania asymetrycznego na zimno przeprowadzono także na miękkich stalach (stal elektrotechniczna oraz stal wolna od atomów międzywęzłowych) [8, 9, 10]. W artykułach [8, 9, 10] opisano wpływ walcowania asymetrycznego z różnymi stosunkami prędkości walcowania (maksymalnie 2:1) oraz różnymi gniotami na strukturę i właściwości materiału. W artykule [8] zauważono, że wraz ze wzrostem

1. INTRODUCTION AND PURPOSE OF RESEARCH

Flat bar cold rolling technologies are continually developed. One such cold rolling method is asymmetric rolling (ASR). In literature [1] asymmetric rolling is described as a modification of the sheet and strip rolling process on an industrial scale. The method consists in the use of working rolls of different diameters, the use of different rotational speeds of rolls or different friction conditions for both rolls. The effects of rolling at different rolling speeds have been tested, both on the structure and mechanical properties of rolled strip and on forces occurring during rolling. The tests carried out [2] show that asymmetric rolling reduces the force occurring during the process, which increases the durability of the rolling mill components, or enables larger draughts per pass.

Literature primarily provides information on cold asymmetric rolling tests on non-ferrous materials, such as: copper alloys [3], aluminum alloys [1, 2, 4, 5], nickel alloys [2, 4] or magnesium alloys [6, 7]. The article [1] describes an asymmetric rolling process of high purity aluminum. A significant increase was found in the yield strength value after asymmetric rolling compared to the material prior to rolling (from approx. 100 MPa to approx. 250 MPa).

Cold asymmetric rolling tests were also carried out on soft steel (electrical steel and interstitial free steel) [8, 9, 10]. The papers [8, 9, 10] describe the effect of asymmetric rolling with different rolling speed ratios (up to 2:1) and various draughts on material structure and properties. The paper [8] notes that the strength properties increase as the asymmetry and draught in-

asymetrii oraz gniotu wzrastają właściwości wytrzymałościowe przy znacznym spadku wydłużenia. Zauważono, że przy zbyt dużej asymetrii prędkości podczas walcowania na zimno występuje poślizg próbki na powierzchni roboczej walca, co uniemożliwia kontynuowanie procesu.

W pracy [11] autorzy podjęli się teoretycznej analizy z zastosowaniem komputerowego programu symulacyjnego Elroll. Zbadano wpływ współczynnika asymetrii podczas walcowania na wygięcie taśmy oraz stwierdzono jego wpływ na siły oraz momenty walcowania. Moment walcowania był większy na walcu o większej średnicy. W artykule [12] zbadano wpływ zastosowania walcowania asymetrycznego przy walcowaniu na gorąco na koszty produkcji. Zastosowanie walcowania asymetrycznego zmniejszyło siły walcowania, co przełożyło się na zmniejszenie ugięcia sprężystego elementów konstrukcyjnych walcarki. Dzięki temu proces walcowania stał się stabilniejszy, co spowodowało zwiększenie dokładności otrzymywanych blach i zmniejszenie udziału braków w całości produkcji.

Praca [13] stanowi kompendium wiedzy dotyczącej walcowania asymetrycznego. Opisano w niej różne rodzaje asymetrii mogące wystąpić podczas walcowania, zarówno te wprowadzane celowo, jak i wywołane zaburzeniami przebiegu procesu. Praca zawiera informacje teoretyczne, wspomagające projektowanie procesów technologicznych, a także opisuje przebieg procesów walcowania asymetrycznego z różnymi rodzajami asymetrii.

2. PRZEBIEG BADAŃ

Zastosowana podczas badań walcarka laboratoryjna typu duo WD-2 (rys. 1), dzięki zintegrowanemu systemowi sterowania, umożliwia walcowanie taśm z różnymi prędkościami obrotowymi walców oraz pomiar sił walcowania. Regulowana w dwóch płaszczyznach wprowadnica walcarki nie tylko prowadzi materiał w płaszczyźnie poziomej, ale również umożliwia przesunięcie w płaszczyźnie pionowej, dzięki czemu możliwe jest wprowadzanie materiału pod różnymi kątami. Średnice użytych walców roboczych wynoszą $\phi 187$ mm.

crease, while there is a significant decrease in elongation. It was noted that with excessive speed asymmetry during cold rolling, a sample slippage occurs on the roll working surface, which prevents process continuation.

In the paper [11] the authors undertook a theoretical analysis using the Elroll computer simulation software. The effect of the asymmetry coefficient on strip bending was examined and the strip bending effect on rolling forces and rolling torques was found. The rolling torque was higher on a larger diameter mill roll. The paper [12] investigates the impact of asymmetric rolling on production costs. The application of asymmetric rolling reduced the rolling forces, which translated into reduced deflection of the rolling mill elastic structural components. As a result, the rolling process became more stable which increased the accuracy of the sheets obtained and reduced the share of rejects in the total production output.

The paper [13] is a compendium of knowledge on asymmetric rolling. It describes the different types of asymmetries that may occur during rolling, both intended and caused by process disturbances. The paper contains theoretical information supporting the process design and describes the course of asymmetric rolling processes with different types of asymmetry.

2. RESEARCH METHODOLOGY

The laboratory duo rolling mill type WD-2 (Fig. 1) used for testing, thanks to its integrated control system, enables strip rolling with various speeds and the measurement of rolling forces. Adjustable in two planes, the mill roll guide not only guides the material in the horizontal plane, but also allows a vertical offset so that material can be fed at different angles. The diameters of the working rolls used are $\phi 187$ mm.



Rys.1. Walcarka laboratoryjna duo WD-2

Fig. 1. Laboratory duo rolling mill WD-2

Materiałem badanym była stal S235, z której przygotowano próbki o wymiarach: 50x100 mm i grubości 2 mm. W tab. 1 podano warunki walcowania – prędkości obwodowe walców oraz ich wzajemny stosunek (wzrastająco) w granicach od 1:1 do 3:1. Przed walcowaniem próbki oczyszczono z rdzy, zadziorów powstałych podczas cięcia oraz odłuszczone. Dzięki tym zabiegom ułatwiono chwyt taśmy przez walce i zmniejszono prawdopodobieństwo wystąpienia sierpowatości po przewalcowaniu.

The test material was S235 steel, from which samples were prepared with the dimensions of 50x100 mm and the thickness of 2 mm. Tab. 1 shows the rolling conditions – the circumferential speeds of the mill rolls and the ratio between them (increasing) from 1:1 to 3:1. Prior to rolling samples were degreased and cleaned of rust and burrs formed during cutting. Thanks to these treatments, the nip of strip by rolls was facilitated and the likelihood of misalignment after rolling was reduced.

Tab. 1. Warunki walcowania

Tab. 1. Rolling conditions

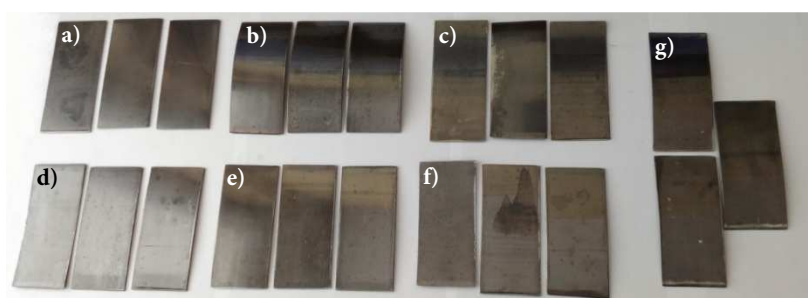
Numery walców Mill roll numbers	Prędkości obwodowa walców V [mm/s] Roll circumferential speeds V [mm/s]			Stosunek V_1/V_2^* V_1/V_2 ratio*	* V_1 i V_2 – prędkość obwodowa walców 1 i 2 * V_1 and V_2 – circumferential speeds of rolls 1 and 2
1.	100	200	300		
2.	100	200	300	1,0:1	
	91	182	273	1,1:1	
	83	167	250	1,2:1	
	77	154	231	1,3:1	
	67	133	200	1,5:1	
	50	100	150	2,0:1	
	33	67	100	3,0:1	

Przyjęto jednakową grubość osiąganą w jednym przepuszczeniu – 1,72 mm. Próby walcowania przy stosunku prędkości obwodowych walców 3:1 nie powiodły się. Zastosowano dodatkowe zmatowienie powierzchni próbek oraz zaostrenie wprowadzanego końca taśmy, co pozwoliło przewalcować taśmę z tym stosunkiem prędkości. Po walcowaniu i określeniu sił walcowania wycięto próbki do badań wytrzymałościowych.

The same thickness achieved in a single pass of 1.72 mm was assumed. Rolling trials at a 3:1 roll circumferential speed ratio failed. Additional dulling of the sample surface and sharpening of the fed strip end were applied, which made it possible to roll the strip at this speed ratio. After rolling and determination of rolling forces, samples were cut for strength testing.

Na rys. 2 przedstawiono zdjęcie przewalcowanych próbek. Zauważono wygięcie próbek walcowanych z różnymi prędkościami. Stopień i kierunek wygięcia próbek zależał od stosunku prędkości walców. Największemu wygięciu ulegały próbki po walcowaniu ze stosunkiem prędkości 1,1:1. Dla stosunków prędkości od 1,2:1 do 2:1 wygięcie poszczególnych walcówek było nieznaczne.

Fig. 2 shows a photo of the rolled samples. Bending of the rolled samples at different speeds was found. The degree and direction of sample bending depended on roll speeds. The samples were subjected to the highest bending after rolling at a speed ratio of 1.1:1. For speed ratios from 1.2:1 to 2:1, bending of individual samples was negligible.



Rys. 2. Próbkę po walcowaniu z różnymi stosunkami prędkości obrotowych walców:

a) 1:1; b) 1,1:1; c) 1,2:1; d) 1,3:1; e) 1,5:1; f) 2:1; g) 3:1

Fig. 2. Samples rolled with different roll speed ratios: a) 1:1; b) 1.1:1; c) 1.2:1; d) 1.3:1; e) 1.5:1; f) 2:1; g) 3:1

3. WYNIKI I DYSKUSJA BADAŃ

3.1. Pomiar sił walcowania

W tab. 2 przedstawiono wyniki pomiarów grubości taśm walcowanych oraz sił procesu walcowania dla różnych stosunków prędkości obrotowych walca górnego i dolnego. Zauważono, że stosując większą prędkość nominalną (100, 200 lub 300 mm/s) i zachowując tę samą nastawę szczeliny walcowniczej, wzrastają siły procesu walcowania oraz maleje uzyskiwany gniot materiału. Skutkiem zwiększonych sił walcowania jest zwiększenie ugięcia zespołu walców, co prowadzi do przewalcowania taśmy w mniejszym stopniu przy większych prędkościach nominalnych.

Wzrost proporcji prędkości obrotowych walców powodował zmniejszanie się sił walcowania. Maksymalne zmniejszenie sił zaobserwowano dla stosunku prędkości 3:1. Siły występujące podczas walcowania były w tym przypadku mniejsze o około 33% niż w przypadku walcowania metodą klasyczną. Rys. 3 przedstawia wartości uśrednionych sił walcowania (dla poszczególnych proporcji prędkości walców) w zależności od stosunku prędkości walców.

3. TEST RESULTS AND DISCUSSION

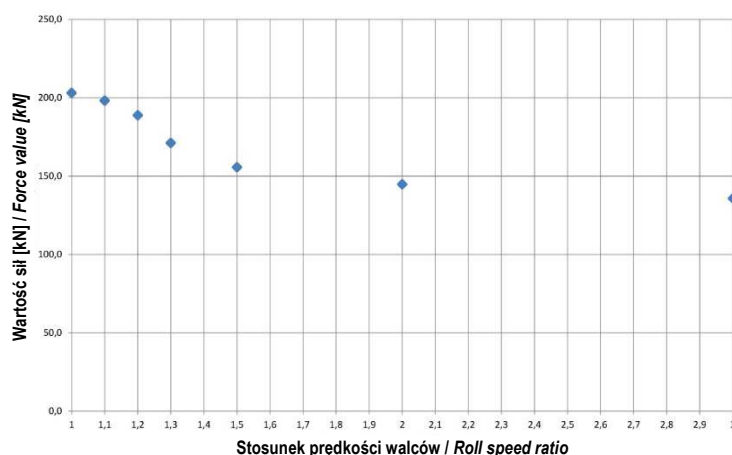
3.1. Measurement of rolling forces

Tab. 2 shows the results of thickness measurement of rolled strips and rolling process forces for different rotational speeds of the upper and lower rolls. It was noted that using a higher nominal speed (100, 200 or 300 mm/s) and maintaining the same roll gap setting, the rolling process forces increase and the resulting material draught is reduced. As a result of increased rolling forces, the roll deflection is increased, leading to strip rolled at a lower degree at higher nominal speeds.

An increase in the roll speed ratios resulted in a decrease in rolling forces. The maximum reduction in forces was observed for a 3:1 speed ratio. The forces occurring during rolling were in this case approx. 33% lower than for rolling using the classical method. Fig. 3 shows the averaged values of the rolling forces (for different roll speed ratios) depending on the roll speed ratios.

Tab. 2. Uzyskane grubości taśm po walcowaniu oraz siły walcowania podczas walcowania poszczególnych próbek
 Tab. 2. Obtained strip thicknesses after rolling and rolling forces during rolling of individual samples

Prędkość obwodowa walca 1 [mm/s] / Roll 1 circumferential speed [mm/s]								
100			200			300		
Prędkość obwodowa walca 2 [mm/s] <i>Roll 2 circumferential speed [mm/s]</i>	Grubość taśmy [mm] <i>Strip thickness [mm]</i>	Siła walcowania [kN] <i>Rolling force [kN]</i>	Prędkość obwodowa walca 2 [mm/s] <i>Roll 2 circumferential speed [mm/s]</i>	Grubość taśmy [mm] <i>Strip thickness [mm]</i>	Siła walcowania [kN] <i>Rolling force [kN]</i>	Prędkość obwodowa walca 2 [mm/s] <i>Roll 2 circumferential speed [mm/s]</i>	Grubość taśmy [mm] <i>Strip thickness [mm]</i>	Siła walcowania [kN] <i>Rolling force [kN]</i>
100	1,72	201	200	1,73	202	300	1,74	206
91	1,71	198	182	1,72	200	273	1,72	197
83	1,70	189	167	1,71	189	250	1,71	189
77	1,72	170	154	1,73	170	231	1,73	173
67	1,74	153	133	1,73	154	200	1,73	160
50	1,74	144	100	1,73	145	150	1,74	146
33	1,75	134	67	1,75	135	100	1,75	139



Rys. 3. Wykres wartości sił w zależności od stosunku prędkości walców

Fig. 3. Chart of force values depending on roll speed ratio

Czas trwania walcowania różnił się w zależności od prędkości nominalnej. Przy prędkości nominalnej wynoszącej 100 mm/s czas walcowania jednej próbki wydłuża się nawet trzykrotnie (w stosunku do czasu walcowania dla prędkości nominalnej 300 mm/s). Wraz ze wzrostem prędkości nominalnej, dla tego samego stosunku prędkości obrotowych walców, wzrastały również siły walcowania.

3.2. Statyczna próba rozciągania

Badania właściwości mechanicznych przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 4483. W tab. 3 zawarto wyniki statycznej

The rolling duration varied depending on the nominal speed. At a nominal speed of 100mm/s the rolling time of a single sample extends up to three times (compared to the rolling time for a nominal speed of 300mm/s). As the nominal speed increased, the rolling forces also increased for the same mill roll speed ratios.

3.2. Static tensile test

Mechanical properties were tested with the use of an Instron 4483 testing machine. Tab. 3 shows the results of a static tensile test of samples

próby rozciągania próbek pobranych z walcówek. Na podstawie uzyskanych wyników zbadanych właściwości mechanicznych stwierdzono, że w przypadku badanych taśm, w zależności od tego, czy proces walcowania jest prowadzony z równymi czy z różnymi prędkościami walców, różnice we właściwościach mechanicznych taśm są pomijalnie małe. Czynnikiem decydującym o właściwościach mechanicznych uzyskiwanych w wyniku walcowania jest gniot.

collected from flat bars. Based on the obtained results of the tested mechanical properties it was found that for the tested strips, depending on whether the rolling process is carried out with equal or different roll speeds, the differences in the mechanical properties of the strips were negligible. The decisive factor for mechanical properties obtained by rolling is the draught.

Tab. 3. Właściwości mechaniczne w statycznej próbie rozciągania próbek pobranych z walcówek

Tab. 3. Mechanical properties in a static tensile test of samples collected from wire rods

Prędkość obwodowa walca 1 – 100 mm/s / Roll 1 circumferential speed of 100 mm/s			
Prędkość obwodowa walca 2 [mm/s] / Roll 2 circumferential [mm/s]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅₀ [%]
100	492	503	16,6
91	452	507	16,1
83	498	536	—
77	480	502	17,8
67	469	495	18,3
50	467	494	22,5
33	451	488	18,7
Prędkość obwodowa walca 1 – 200 mm/s / Roll 1 circumferential speed of 200 mm/s			
Prędkość obwodowa walca 2 [mm/s] / Roll 2 circumferential [mm/s]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅₀ [%]
200	477	497	19,9
182	450	506	15,7
167	487	509	15,1
154	486	504	16,5
133	476	499	19,3
100	477	499	19,8
67	436	494	21,6
Prędkość obwodowa walca 1 – 300 mm/s / Roll 1 circumferential speed of 300 mm/s			
Prędkość obwodowa walca 2 [mm/s] / Roll 2 circumferential [mm/s]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅₀ [%]
300	473	499	22,4
273	451	503	17,2
250	484	510	15,6
231	486	506	19,5
200	484	505	19,6
150	461	496	21,3
100	462	495	19,5

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W przedstawionej pracy dla walcowania na zimno stali konstrukcyjnej udało się uzyskać zmniejszone siły procesu, tak jak autorom w pracach [2, 11, 12]. Prowadzony proces walcowania asymetrycznego był stabilniejszy niż w przypadku

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The paper presents cold rolling tests of structural steel in which process forces were successfully reduced, as was the case of authors of the papers [2, 11, 12]. The asymmetric rolling process was more stable than the classical rolling process,

walcowania klasycznego, z równymi prędkościami walców [12]. Problemem pojawiającym się również w pracach innych autorów był poślizg wprowadzanej taśmy [8] oraz wygięcie walcówki zależne od stosunku prędkości walców [11]. Poślizg walcówki udało się wyeliminować poprzez zmatowienie próbek i zaostrenie końcówki, natomiast wygięcie próbek dla stosunku od 1,2:1 do 2:1 było nieznaczne i jest możliwe do wyeliminowania w rzeczywistym procesie walcowania na zimno poprzez zastosowanie dodatkowych urządzeń w linii walcowniczej, np. nawijaka utrzymującego napięcie taśmy i tym samym niwelującego wygięcie próbek.

- Przewalcowano z powodzeniem próbki metodą walcowania asymetrycznego na walczarce laboratoryjnej typu DUO z maksymalnym stosunkiem prędkości walcowania walców górnego i dolnego wynoszącym 3:1.
- Siły walcowania były mniejsze nawet o 33% dla walcowania asymetrycznego (przy stosunku prędkości 3:1 i prędkości nominalnej 100 mm/s) niż w przypadku klasycznego walcowania.
- Przy gnioście procentowym wynoszącym ok. 14%, w odniesieniu do walcowania metodą klasyczną, nie stwierdzono wpływu walcowania z różnymi prędkościami liniowymi walców górnego i dolnego na właściwości mechaniczne i twardość badanych próbek.
- Z przeprowadzonych badań wynika, że uzyskane walcowaniem asymetrycznym ziarna są wydłużone w stosunku do ziaren uzyskanych w procesie prowadzonym z równymi prędkościami liniowymi walców.
- Czas trwania procesu walcowania w przeprowadzonych badaniach wynikał z prędkości walcowania wolniejszego spośród walców.

Możliwym kierunkiem dalszych badań walcowania na zimno stali konstrukcyjnych może być uzyskanie struktury ultra drobnej poprzez wykorzystanie walcowania asymetrycznego w celu zwiększenia jednorazowego gniośtu i tym samym walcowaniu metodami dużego odkształcenia plastycznego. Metody dużego odkształcenia plastycznego z powodzeniem służą do uzyskiwania rozdrobnionej struktury w metalach nieżelaznych.

with equal rolling speeds [12]. A problem raised also in the papers of other authors was the slippage of the strip fed [8] and the bending of the wire rod depending on roll speeds [11]. Wire rod slippage was eliminated by sample surface dulling and end sharpening, while sample bending for a ratio of 1.2:1 to 2:1 was negligible and can be eliminated in the actual cold rolling process by using additional roll line machines, e.g. a reeling machine maintaining the strip tension and thus reducing sample bending.

- *Samples were successfully asymmetrically rolled with the use of a laboratory DUO rolling mill with a maximum roll speed rate of 3:1 of the upper and lower rolls.*
- *Rolling forces were lower as much as 33% for asymmetric rolling (with a 3:1 speed ratio and a nominal speed of 100 mm/s) than for classical rolling.*
- *With a percentage draught of about 14%, no effect with respect to rolling by conventional methods was observed of rolling with different linear velocities of the upper and lower rolls on the mechanical properties and hardness of the test samples.*
- *The completed tests show that for the asymmetric rolling the grains are elongated compared to the grains obtained in the process carried out at equal linear speeds of rolls.*
- *The duration of the rolling process in the tests carried out was due to the rolling speed of the slower rolls.*

A possible direction of further cold rolling testing of structural steel may be to obtain an ultrafine particle structure by using asymmetric rolling to increase the single draught and thus rolling with the use of high plastic deformation methods. High plastic deformation methods are used successfully to obtain a finely reduced structure in non-ferrous metals.

PODZIĘKOWANIA

Badania przedstawione w niniejszej pracy zostały przeprowadzone w ramach realizowanej w Zakładzie Tłoczenia Instytutu Obróbki Plastycznej w Poznaniu w 2016 roku pracy własnej pt. „Badania przełomowej technologii walcowania na zimno, na zmodernizowanej walczarce laboratoryjnej, z użyciem różnych prędkości obrotowych walców oraz różnego kąta wejścia taśmy, w celu zbadania wpływu przedstawionych parametrów na siły procesu oraz strukturę i kształt uzyskanej taśmy”.

LITERATURA

- [1] Jiang J., Y. Ding, F. Zuo, A. Shan. 2009. „Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminium by asymmetric rolling”. *Scripta Materialia* 60: 905–908.
- [2] Polkowski W., P. Józwiak, Z. Bojar. 2015. „Differential speed rolling of Ni₃Al based intermetallic alloy – Analysis of the deformation process”. *Materials Letters* 139: 46–49.
- [3] Kim W.J., K.E. Lee, S.-H. Choi. 2009. „Mechanical properties and microstructure of ultra fine-grained copper prepared by a high-speed-ratio differential speed rolling”. *Materials Science and Engineering A* 506: 71–79.
- [4] Polkowski W., E. Pęczek, D. Zasada, Z. Komorek. 2015. „Differential speed rolling of Ni₃Al based intermetallic alloy – Effect of applied processing on structure and mechanical properties anisotropy”. *Materials Science and Engineering A* 647: 170–183.
- [5] Jin H., D.J. Lloyd. 2005. „The reduction of planar anisotropy by texture modification through asymmetric rolling and annealing in AA 5754.” *Materials Science and Engineering A* 399: 358–367.
- [6] Kim W.Y., W.J. Kim. 2014. „Fabrication of ultrafine-grained Mg-3Al-1Zn magnesium alloy sheets using a continuous high-ratio differential speed rolling technique”. *Materials Science and Engineering A* 594: 189–192.
- [7] Gong X., S.B. Kang, S. Li, J.H. Cho. 2009. „Enhanced plasticity of twin-roll cast ZK60 magnesium alloy through differential speed rolling.” *Materials and Design* 30: 3345–3350.
- [8] Orlov D., A. Pougis, R. Lapovok i in. 2013. „Asymmetric Rolling of Interstitial – Free Steel Using Differential Roll Diameters. Part I: Mechanical Properties and Deformation Textures”. *Metallurgical and Materials Transactions A* 44A: 4346–4359.

ACKNOWLEDGEMENTS

The tests presented in this paper were performed as part of the work carried out at the Press Forming Department of the Metal Forming Institute in Poznań in 2016 “Tests of a breakthrough cold rolling technology on an upgraded laboratory rolling mill using different roll speeds and different angles of strip feeding to examine the impact of the presented parameters on the process forces and the structure and shape of the resulting strip”.

REFERENCES

- [1] Jiang J., Y. Ding, F. Zuo, A. Shan. 2009. “Mechanical properties and microstructures of ultrafine-grained pure aluminium by asymmetric rolling”. *Scripta Materialia* 60: 905–908.
- [2] Polkowski W., P. Józwiak, Z. Bojar. 2015. “Differential speed rolling of Ni₃Al based intermetallic alloy – Analysis of the deformation process”. *Materials Letters* 139: 46–49.
- [3] Kim W.J., K.E. Lee, S.-H. Choi. 2009. “Mechanical properties and microstructure of ultra fine-grained copper prepared by a high-speed-ratio differential speed rolling”. *Materials Science and Engineering A* 506: 71–79.
- [4] Polkowski W., E. Pęczek, D. Zasada, Z. Komorek. 2015. “Differential speed rolling of Ni₃Al based intermetallic alloy – Effect of applied processing on structure and mechanical properties anisotropy”. *Materials Science and Engineering A* 647: 170–183.
- [5] Jin H., D.J. Lloyd. 2005. “The reduction of planar anisotropy by texture modification through asymmetric rolling and annealing in AA 5754.” *Materials Science and Engineering A* 399: 358–367.
- [6] Kim W.Y., W.J. Kim. 2014. “Fabrication of ultrafine-grained Mg-3Al-1Zn magnesium alloy sheets using a continuous high-ratio differential speed rolling technique”. *Materials Science and Engineering A* 594: 189–192.
- [7] Gong X., S.B. Kang, S. Li, J.H. Cho. 2009. “Enhanced plasticity of twin-roll cast ZK60 magnesium alloy through differential speed rolling.” *Materials and Design* 30: 3345–3350.
- [8] Orlov D., A. Pougis, R. Lapovok et al. 2013. “Asymmetric Rolling of Interstitial – Free Steel Using Differential Roll Diameters. Part I: Mechanical Properties and Deformation Textures”. *Metallurgical and Materials Transactions A* 44A: 4346–4359.

- [9] Sha Y.H., F. Zhang, S.C. Zhou, W. Pei, L. Zuo. 2008. „Improvement of recrystallization texture and magnetic property in non – oriented silicon steel by asymmetric rolling”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320: 3930–396.
- [10] Wauthier A., Regle H., Formigoni J., Herman G. 2009. „The effects of asymmetrical cold rolling on kinetics, grain size and texture in IF steels”. *Materials Characterization*: 90–95.
- [11] Markowski J., H. Dyja, M. Knapiński, A. Kawałek. 2003. „Theoretical analysis of the asymmetric rolling of sheets on leader and finishing stands”. *Journal of Materials Processing Technology* 138: 183–188.
- [12] Kawałek A., H. Dyja, M. Knapiński. 2008. „Wpływ asymetrycznego walcowania na poprawę wskaźników techniczno-ekonomicznych procesu walcowania blach na gorąco”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 6: 316–320.
- [13] Dyja H., W. M. Sałganik, A. M. Piesin, A. Kawałek. 2008. *Asymetryczne walcowanie blach cienkich*. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [9] Sha Y.H., F. Zhang, S.C. Zhou, W. Pei, L. Zuo. 2008. “Improvement of recrystallization texture and magnetic property in non – oriented silicon steel by asymmetric rolling”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320: 3930–396.
- [10] Wauthier A., Regle H., Formigoni J., Herman G. 2009. “The effects of asymmetrical cold rolling on kinetics, grain size and texture in IF steels”. *Materials Characterization*: 90–95.
- [11] Markowski J., H. Dyja, M. Knapiński, A. Kawałek. 2003. “Theoretical analysis of the asymmetric rolling of sheets on leader and finishing stands”. *Journal of Materials Processing Technology* 138: 183–188.
- [12] Kawałek A., H. Dyja, M. Knapiński. 2008. “The effect of asymmetrical rolling on the improvement of the technical and economic indices of the hot plate rolling proces”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 6: 316–320.
- [13] Dyja H., W. M. Sałganik, A. M. Piesin, A. Kawałek. 2008. *Asymmetrical rolling of metal sheets*. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.