



Rola obróbki cieplno-plastycznej w kształtowaniu struktury i właściwości mechanicznych stali przeznaczonych do walcowania walcówki

The role of heat-plastic treatment in shaping the structure and mechanical properties of steel types meant for rolling wire rods

(1) Grzegorz Niewielski¹, (2) Dariusz Kuc¹, (3) Eugeniusz Hadasik*¹, (4) Ivo Schindler², (5) Iwona Bednarczyk¹

¹ Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Instytut Inżynierii Materiałowej, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

² VSB – TUO, Department of Materials Forming FMMI – Faculty of Metallurgy and Materials Engineering, 17. listopadu 15, Ostrava – Poruba, Czechia

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 5.03.2018

Recenzja: 28.03.2018

Akceptacja: 29.06.2018

Wkład autorów

- (1) Koncepcja badań, analiza całości wyników badań
- (2) Ilościowe określenie mikrostruktury stali perlitycznej
- (3) Opracowanie wyników badań plastometrycznych
- (4) Opracowanie programu badań modelowego walcowania i opracowanie wyników
- (5) Analiza mikrostruktury badanych stali 23MnB4, 30MnB4, C45, C70

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów procesu walcowania na podatność do plastycznego odkształcania, właściwości mechaniczne i strukturę stali gatunku 23MnB4, 30MnB4, C45 i C70 przeznaczonych do walcowania walcówki w nowoczesnej walcowni ciągłej. Ocenę plastyczności dokonano w próbie skręcania na gorąco przy użyciu plastometru skrętnego, w zakresie temperatury walcowania walcówki od 850 do 1150°C z prędkością odkształcenia 0,1, 1 i 10 s⁻¹. Określono zależności naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia oraz wielkości charakteryzujące podatność takie, jak: maksymalne naprężenie uplastyczniające, wartość odkształcenia odpowiadająca maksymalnemu naprężeniu oraz odkształcenie do zniszczenia. Wielkości te uzależniono od temperatury i prędkości odkształcenia oraz od energii aktywacji i parametru Zenera–Hollomona. Na podstawie przeprowadzonych badań plastometrycznych dla stali 23MnB4, 30MnB4, C45 i C70 stwierdzono, że charakteryzują się dużą odkształcalnością – sięgającą wartości odkształcenia granicznego ϵ_g powyżej wartości 20 w najniższej temperaturze odkształcania – i ciągłym zwiększaniem odkształcalności ze wzrostem temperatury. Natomiast wartości maksymalnego naprężenia uplastyczniającego są zróżnicowane w zależności od gatunku badanej stali, a w większym stopniu zależy od temperatury i prędkości odkształcania. Badania dotyczące wpływu parametrów walcowania i chłodzenia na ilościowe cechy mikrostruktury perlitu i właściwości mechaniczne walcówki realizowano na modelowych walcarkach w VSB Ostrawa. Badania mikrostruktury badanych stali 23MnB4, 30MnB4, C45 i C70 po badaniach plastometrycznych oraz próbach walcowania przeprowadzono przy użyciu technik mikroskopii świetlnej i skaningowej. Dodatkowo ilościową analizę mikrostruktury stali perlitycznej wykonano z zastosowaniem nowego programu komputerowego „PILS” – *Perlite Inter-Lamellar Spacing*.

Słowa kluczowe: walcówka, stale węglowe, obróbka cieplno-plastyczna, plastyczność na gorąco, struktura, właściwości mechaniczne

Article info

Received: 5.03.2018

Reviewed: 28.03.2018

Accepted: 29.06.2018

Abstract

The paper presents the tests results of influence of the rolling process parameters on the liability to plastic deformation, mechanical properties and structure of steel types 23MnB4, 30MnB4, C45 and C70 meant for rolling wire rods in a modern continuous mill. The plasticity assessment was conducted with the use of hot torsion test using torsional plasto-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 32 603 44 74; e-mail: eugeniusz.hadasik@polsl.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 32 603 44 74; e-mail: eugeniusz.hadasik@polsl.pl

Authors' contribution

- (1) Concept of research, analysis of all the research results
- (2) Quantitative analysis of microstructure of pearlitic steel
- (3) Plastometric tests results analysis
- (4) Model rolling tests and results analysis
- (5) Microstructure tests of steel types 23MnB4, 30MnB4, C45, C70

meter in rolling temperature range for the wire rod from 850 to 1150°C with deformation speed of 0.1, 1 and 10 s⁻¹. The dependencies of yield stress to deformation were determined together with values characterising the liability such as: maximum yield stress, value of deformation equivalent to maximum stress and deformation to failure. Those values were dependent on temperature and speed of deformation as well as activation energy and Zener-Hollomon parameter. It was stated, on the basis of conducted plastometric tests of steel types 23MnB4, 30MnB4, C45 and C70 that they are characterised with big deformability reaching the value of boundary deformation ε_g above the value of 20 in the lowest deformation temperature and constant increase of deformability with the increase of temperature. However, the values of maximum yield stress vary depending on tested steel type and they are more dependent on temperature and speed of deformation. Tests concerning the influence of rolling parameters and cooling on the quantitative features of pearlite microstructure and mechanical properties of wire rods were conducted on model rolling mills in VSB Ostrava. Microstructure tests of steel types 23MnB4, 30MnB4, C45 and C70 after plastometric tests and rolling tests were conducted with the use of light and scanning microscopy. Additionally, quantitative analysis of microstructure of pearlitic steel was conducted with the use of new computer program "PILS" – Pearlite Inter-Lamellar Spacing.

Keywords: wire rod, carbon steel, heat-plastic treatment, hot plasticity, structure, mechanical properties

1. WPROWADZENIE

W ciągu ostatnich kilkunastu lat obserwuje się znaczący rozwój walcowni walcówki – zarówno w zakresie urządzeń, jak i technologii walcowania – wymuszony wzrastającymi wymaganiami odbiorców oraz dążeniem do obniżenia kosztów produkcji [1]. Nowoczesne walcownie walcówki, wyposażone w układy ciągłe, bloki walcownicze i układy regulowanego chłodzenia, umożliwiają walcowanie z prędkością do 120 m/s, z zastosowaniem obróbki cieplno-plastycznej oraz otrzymanie walcówki w kręgach o masie do 2000 Mg o bardzo dobrej jakości powierzchni, wąskich odchyłkach wymiarowych oraz pożądanej strukturze i właściwościach mechanicznych. Realizacja eksperymentów dla doboru optymalnych parametrów procesu walcowania jest bardzo trudna, dlatego stosuje się metody modelowania fizycznego, które w możliwie dużym stopniu powinny odwzorowywać warunki rzeczywistego procesu. Najczęściej stosowanymi metodami oceny wpływu parametrów odkształcania na właściwości mechaniczne i strukturę są próby ściskania, skręcania, udarności oraz modelowe próby spęczania i walcowania. Jednak stosowane obecnie metody fizycznego modelowania mają jednak ograniczenia w zakresie odwzorowania prędkości odkształcania oraz wartości zadane go pojedynczego i sumarycznego

1. INTRODUCTION

In recent years, a significant development of rod mills has been observed, both in terms of equipment and in technology of rolling, which has been forced by growing requirements of the recipients and by the need to reduce production costs [1]. Modern rod mills are equipped with continuous systems, rolling blocks and systems of regulated cooling which help to roll with the speed of up to 120 m/s with the use of heat-plastic treatment and producing wire rods in wire coils weighing up to 2000 Mg and very good quality of surface, with small dimension deviations and required structure and mechanical properties. Conduction of experiments in order to choose the optimum parameters of rolling process is very difficult. That is why physical modelling is applied which should reflect the conditions of a real process to a large extent. Most commonly used assessment methods of the influence of deformation parameters on mechanical properties and structure are: compression tests, torsion tests, impact tests, model upsetting and rolling tests. However, currently applied methods of physical modelling have limitations in terms of imaging the speed of deformation and the value of given singular and total deformation [2, 3]. This paper presents a summary of tests results which led to determination of the influence of rolling process

odkształcenia [2, 3]. W przedstawionej pracy dokonano podsumowania wyników badań zmierzających do określenia wpływu parametrów procesu walcowania na podatność do plastycznego odkształcania, właściwości mechaniczne oraz strukturę stali gatunku 23MnB4, 30MnB4, C45 i C70 przeznaczonych do walcowania walcówki w nowoczesnej walcowni ciągłej. Badania realizowano przy użyciu plastometru skrętnego znajdującego się na wyposażeniu Instytutu Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej oraz walcowania na modelowych walcarkach w VSB-TUO Ostrawa, a także w warunkach przemysłowych.

2. BADANIA PLASTOMETRYCZNE

Materiał do badań stanowiły pręty ze stali gatunku 23MnB4, 30MnB4, C45 i C70 pobrane po walcowaniu kęsisk w wykrojach wydłużających bloku walcowni ciągłej. Zawartość podstawowych pierwiastków wybranych do badań plastyczności gatunków stali podano w tab. 1.

Tab.1. Skład chemiczny badanych stali

Tab. 1. Chemical composition of tested steel types

Symbol stali Steel	Zawartość pierwiastków, [% mas.] / Element content, [% mas.]								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	B
23MnB4	0,21	0,97	0,10	0,014	0,009	0,26	0,07	0,17	0,0030
30MnB4	0,31	1,06	0,23	0,013	0,007	0,22	0,07	0,16	0,0030
C45	0,49	0,74	0,22	0,013	0,015	0,08	0,07	0,15	0,0003
C70	0,71	0,57	0,22	0,010	0,011	0,05	0,06	0,13	0,0002

Próby skręcania na gorąco dla wybranych czterech gatunków stali przeprowadzono dla zakresu temperatury walcowania walcówki od 850 do 1150°C i z prędkością obrotową 5, 50 oraz 500 obr./min, co odpowiada prędkości odkształcania 0,1, 1,0 i 10 s⁻¹. Próbkę nagrzewano do temperatury 1150°C, wygrzewano w tej temperaturze przez 30 sekund, a następnie chłodzono do temperatury odkształcania i skręcano do zniszczenia. Na podstawie rejestrowanego momentu skręcającego w funkcji liczby skręceń próbki określono wielkości charakteryzujące podatność stali do plastycznego kształtowania takie, jak: maksymalne naprężenie uplastyczniające σ_p , odkształcenie odpowiadające maksymalnemu naprężeniu ε_p oraz odkształcenie do zniszczenia ε_g

parameters on the liability to plastic deformation, influence on mechanical properties and structure of steel types 23MnB4, 30MnB4, C45 and C70D intended for rolling wire rods in modern continuous mill. Tests were conducted with the use of torsion plastometer which is owned by the Institute of Materials Engineering at Silesian University of Technology and rolling on model mills in VSB-TUO Ostrava as well as in real industrial conditions.

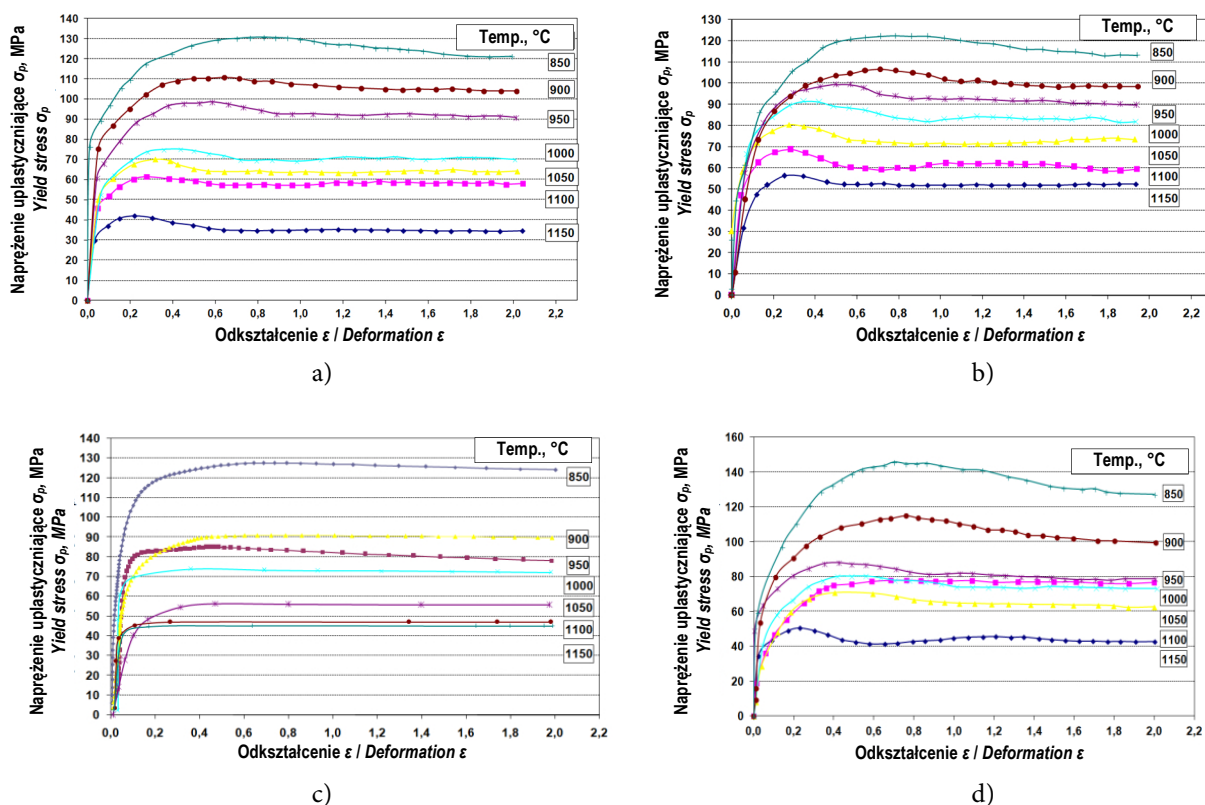
2. PLASTOMETIC TESTS

Materials for tests were rods made of steel types 23MnB4, 30MnB4, C45 and C70D taken after slab rolling in stretching pass of continuous mill block. The amount of the base chemical elements chosen for plasticity tests of steel types is presented in Tab. 1.

Hot torsion tests for the selected 4 steel types were conducted in rolling wire rods temperature range from 850 to 1150°C with rotational speed of 5, 50 and 500 rotation/min, which is the equivalent of deformation speed of 0.1, 1.0 and 10 s⁻¹. Samples were heated up to temperature of 1150°C, soaked in this temperature for 30 seconds and then cooled to deformation temperature and twisted till failure. Basing on the recorded torsional moment as a function of the number of sample torsions, the following values characterising the steel liability to plastic forming have been determined: maximum yield stress σ_p , value of deformation equivalent to maximum stress ε_p and deformation to failure ε_g [4, 5]. The course of dependency of yield stress on deformation in tested

[4, 5]. Przebieg zależności naprężenia uplastyczniającego od odkształcenia badanych stali, dla różnej temperatury skręcania i prędkości odkształcenia 1 s^{-1} , pokazano na rys. 1. Badane stale charakteryzowały się dużą odkształcalnością sięgającą wartości odkształcenia granicznego ε_g powyżej 20, dlatego przedstawiony zakres odkształcenia ograniczono dla wartości równej 2,0.

steel types, for different torsion temperatures and deformation speed of 1 s^{-1} is shown in Fig. 1. Tested steel types are characterised with big deformability reaching the boundary deformation ε_g above 20 which is why the presented deformation range is limited to the value equal 2.0.



Rys. 1. Naprężenie uplastyczniające σ_p w funkcji odkształcenia ε dla stali: a) 23MnB4, b) 30MnB4, c) C45, d) C70 podczas skręcania w temperaturze od 850°C do 1150°C z prędkością odkształcenia 1 s^{-1}

Fig. 1. Yield stress σ_p as a function of deformation ε for steel types a) 23MnB4, b) 30MnB4, c) C45, d) C70 during torsion in temperature from 850°C to 1150°C with deformation speed of 1 s^{-1}

Dla wszystkich badanych gatunków stali, niezależnie od realizowanego zakresu parametrów odkształcenia, krzywe płynięcia mają charakterystyczny przebieg z wyraźnie zaznaczonym maksimum naprężenia uplastyczniającego σ_{pp} , następnym spadkiem naprężenia uplastyczniającego i zakresem stałej wartości naprężenia uplastyczniającego, co jest typowe dla zajścia procesów rekrytalizacji dynamicznej. Jednocześnie jest zachowana prawidłowość przesunięcia maksimum w stronę mniejszych wartości odkształcenia wraz ze zwiększaniem temperatury oraz wzrost wartości naprężenia ze zwiększaniem prędkości odkształcenia. Położenie maksimum naprężenia

For all tested steel types, regardless of the range of applied deformation parameters, the flow curves have characteristic shape with significantly marked maximum yield stress σ_{pp} , followed by a decrease of yield stress and a range of constant value of yield stress which is typical of dynamic recrystallisation process. At the same time, there is a regularity maintained of maximum shift towards smaller deformation values with temperature increase and increase of stress values together with increase of deformation speed. The location of maximum yield stress is highly dependent on the deformation speed. For the smallest deformation speed it is situated in the range from 0.16 to

uplastyczniającego silnie zależy od prędkości odkształcania. Dla najmniejszej prędkości odkształcania mieści się w zakresie od 0,16 do 0,72, a dla największej od 0,53 do 1,55 i maleje wraz ze wzrostem temperatury. Porównanie wartości maksymalnego naprężenia uplastyczniającego σ_{pp} w zależności od temperatury i prędkości odkształcania pokazano na rys. 2.

W celu matematycznego opisu wpływu parametrów procesu na właściwości obliczono parametr Zenera-Hollomona Z z zależności (1):

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

a występującą w równaniu energię aktywacji Q obliczono z równania konstytutywnego (2):

$$\dot{\epsilon} = C \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \times (\sinh(\alpha \sigma_{pp}))^n, \quad (2)$$

gdzie: C , α , n – współczynniki przy użyciu programu komputerowego ENERGY 4.0 [7].

0.72 and for the biggest between 0.53 and 1.55 and decreases with the increase of temperature. Comparison of the values of maximum yield stress σ_{pp} depending on temperature and deformation speed is presented in Fig. 2.

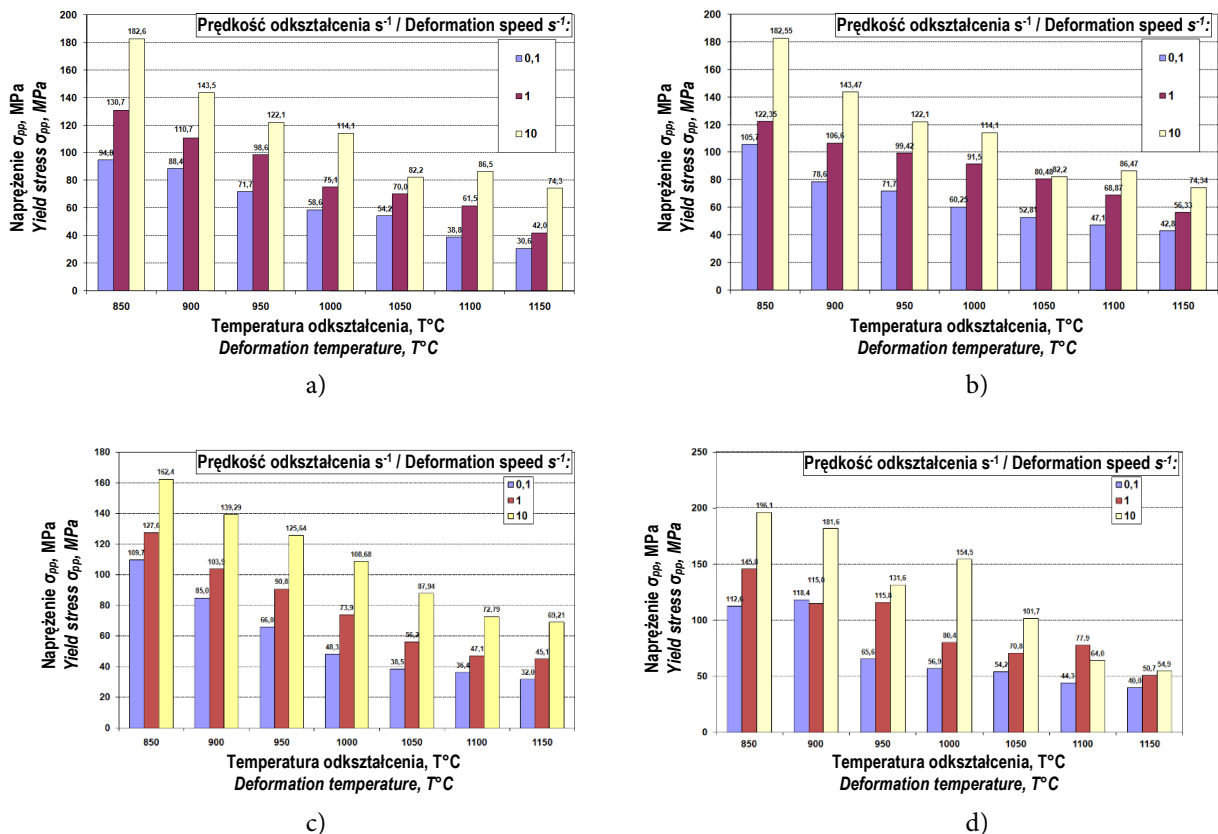
In order to describe the influence of process parameters on the properties in mathematical language there was Zener-Hollomon Z parameter calculated from the equation (1):

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

activation energy Q which appears in the equation was calculated from the constitutive equation(2):

$$\dot{\epsilon} = C \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \times (\sinh(\alpha \sigma_{pp}))^n, \quad (2)$$

where: C , α , n – are coefficients, with the use of computer program ENERGY 4.0 [7].



Rys. 2. Maksymalne naprężenie uplastyczniające σ_{pp} w zależności od temperatury i prędkości odkształcania $\dot{\epsilon}$ dla stali: a) 23MnB4, b) 30MnB4, c) C45, d) C70

Fig. 2. Maximum yield stress σ_{pp} depending on temperature and deformation speed $\dot{\epsilon}$ for steel types: a) 23MnB4, b) 30MnB4, c) C45, d) C70

Energję aktywacji wyznaczono z zastosowaniem programu ENERGY 4.0 [6]. Maksymalne naprężenie uplastyczniające σ_{pp} w funkcji parametru Z obliczono z przekształconej zależności (3):

$$\sigma_{pp} = \frac{1}{\alpha} \cdot \arg \sinh \left(\sqrt[n]{\frac{Z}{C}} \right). \quad (3)$$

Odształcenie ε_p odpowiadające maksymalnemu naprężeniu uplastyczniającemu w funkcji parametru Z wyznaczono z zależności wykładniczej (4):

$$\varepsilon_p = U \cdot Z^W, \quad (4)$$

gdzie : U i W – stałe materiałowe.

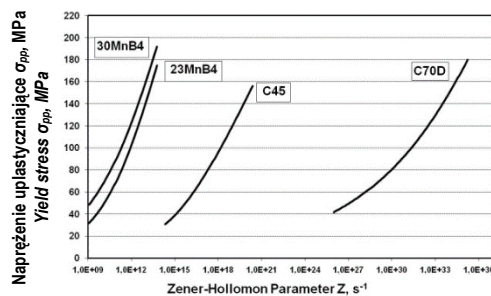
Przebieg zależności maksymalnego naprężenia uplastyczniającego σ_{pp} i odkształcenia ε_p od parametru Zenera–Hollomona Z podano na rys. 3.

Większe wartości energii aktywacji Q i stałej n odnoszą się dla stali o większej zawartości węgla, a tym samym im większa zawartość węgla tym zależności naprężenia i odkształcenia przesuwają się w stronę większych wartości parametru Zenera–Hollomona.

3. MODELWE PRÓBY WALCOWANIA

Określenie wpływu parametrów walcowania i chłodzenia na strukturę i właściwości mechaniczne stali 23MnB4 i C70 realizowano na modelowej walcowni półciągłej w VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Metallurgy and Materials Engineering [8, 9, 10].

Walcowanie wstępne prętów wykonano w 6 przepustach ze średnicy $\phi 30$ na $\phi 15,8$ mm, na rewersyjnej walcarce wstępnej. Przed walcowaniem pręty nagrzewano do temperatury 1100°C z czasem wytrzymania 30 minut.



a)

Activation energy was determined with the use of computer program ENERGY 4.0. Maximum yield stress σ_{pp} in parameter Z function was calculated with the use of transform (3):

$$\sigma_{pp} = \frac{1}{\alpha} \cdot \arg \sinh \left(\sqrt[n]{\frac{Z}{C}} \right). \quad (3)$$

Deformation ε_p equivalent to maximum yield stress as a function of parameter Z was calculated from exponential relationship (4):

$$\varepsilon_p = U \cdot Z^W, \quad (4)$$

where : U and W – material constants.

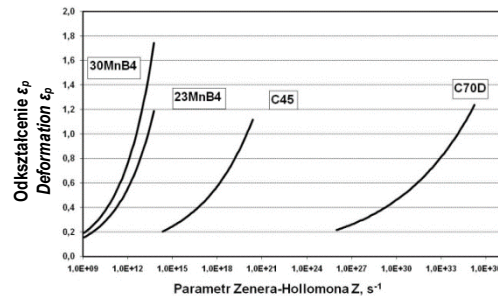
The course of dependency of maximum yield stress σ_{pp} and deformation ε_p on Zener–Hollomon parameter Z are shown in Fig. 3.

Higher values of activation energy Q and constant n refer to steel types with higher carbon content and, consequently, the bigger content of carbon the more the dependency of stress and deformation shift towards bigger values of Zener–Hollomon parameter.

3. MODEL ROLLING TESTS

Determination of the influence of rolling and cooling parameters on the structure and mechanical properties of 23MnB4 and C70 steel was conducted on a model semi-continuous rolling mill in VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Metallurgy and Materials Engineering [8, 9, 10].

Initial rolling of the rods from the diameter of $\phi 30$ to $\phi 15.8$ mm, was performed on a reverse preliminary rolling mill, in 6 passes. Prior to rolling the rods were heated up to the temperature of 1100°C with holding time of 30 minutes.



b)

Rys 3. Zależności maksymalnego naprężenia uplastyczniającego σ_{pp} (a) i odkształcenia ε_p (b) od parametru Zenera–Hollomona Z

Fig 3. Dependency of maximum yield stress σ_{pp} (a) and deformation ε_p (b) on Zener–Hollomon parameter, Z

Walcowanie wykańczające prętów ze średnicy $\phi 15,6$ na $\phi 9,8$ mm prowadzono na cztero-klatkowym ciągłym bloku wykańczającym z temperaturą końca walcowania: 750, 900, 1020°C dla stali 23MnB4 oraz 750, 800, 850 oraz 920°C dla stali C70. Po walcowaniu prętów ze stali 23MnB4 zastosowano dwa warianty chłodzenia. W pierwszym pręty chłodzono na powietrzu do temperatury 550°C, a następnie z piecem z szybkością 0,4°C/s do temperatury 400°C oraz kolejno na powietrzu do temperatury otoczenia. W drugim pręty z temperatury walcowania studzono wolno z piecem do temperatury 400°C z szybkością 0,4°C/s, a następnie z piecem do temperatury otoczenia. Pręty ze stali C70 chłodzono tak jak dla stali 23MnB4 w pierwszym wariantcie chłodzenia, a dodatkowo w celu określenia wpływu przechłodzenia na właściwości mechaniczne, dla prętów walcowanych w temperaturze 920°C stosowano szybkie chłodzenie prysznicem wodnym do temperatury 665, 655, 625, 420 i poniżej 400°C. Z walcowanych prętów wykonano próbki o przekroju okrągłym do badań właściwości mechanicznych zgodnie z PN-EN ISO 6892-1. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100. Wyznaczono: wytrzymałość na rozciąganie (R_m), granicę plastyczności ($R_{p0,2}$), wydłużenie (A_5) oraz przewężenie (Z). Pomiar twardości realizowano przy użyciu twardościomierza Zwick typu 3212002/00. Badania mikrostruktury przeprowadzono na mikroskopie świetlnym typu Olympus GX51 przy powiększeniu 200–1000x oraz na mikroskopie skaningowym Hitachi S-4200, przy powiększeniu 5000–15000x. Za pomocą specjalistycznego oprogramowania dokonano ilościowej oceny mikrostruktury perlitu (program komputerowy „PILS” – Pearlite Inter-Lamellar Spacing [11]) a w szczególności grubości płytek (λ_{sr}) i odległości między płytkami cementytu (l_{sr}). Obrazy mikrostruktury rejestrowano na mikroskopie skaningowym, przy powiększeniu do 15000x. Wyznaczono średnie odległości między płytkami cementytu (l_{sr}), grubości płytek (λ_{sr}) oraz wskaźniki zmienności tych parametrów.

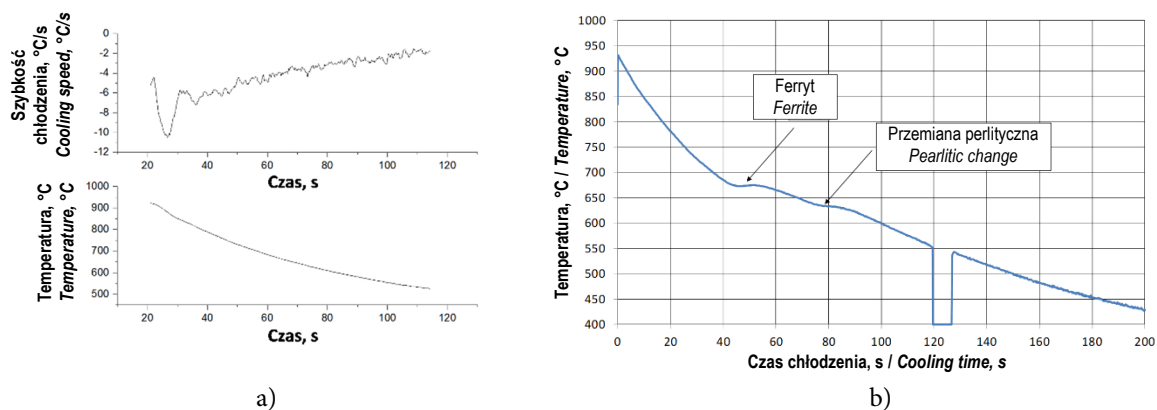
Chłodzenie prętów ze stali 23MnB4 na powietrzu, z szybkością około 5°C/s (rys. 4a), zapewnia otrzymanie struktury ferrytyczno-perlitycznej, o czym świadczą obserwowane przemiany na zarejestrowanej krzywej chłodzenia (rys. 4b) oraz obserwacje mikrostruktury (rys. 5).

Finish rolling of rods from diameter of $\phi 15.6$ to $\phi 9.8$ mm was conducted on four-stand finishing train with final rolling temperature of: 750, 900, 1020°C for steel 23MnB4 and 750, 800, 850 and 920°C for steel C70. After rolling rods of steel 23MnB4 there were two options of cooling applied. In the first case the rods were cooled in air to temperature of 550°C, next with furnace at a speed of 0.4°C/s to temperature of 400°C and next in air to room temperature. In the second option, the rods were slowly cooled in furnace from rolling temperature to 400°C with the speed of 0.4°C/s and next with furnace to room temperature. Rods from steel C70 were cooled just like those of steel 23MnB4 in first cooling option and additionally, to determine the influence of overcooling on mechanical properties, for rods rolled in temperature of 920°C, the quick cooling with water shower was applied to temperatures of 665, 655, 625, 420 and below 400°C. Samples with round cross-section were prepared from rolled rods to test mechanical properties in accordance with norm PN-EN ISO 6892-1. Tests were conducted on testing machine Zwick/Roell Z100. The following values were determined: tensile strength (R_m), flow stress ($R_{p0,2}$), elongation (A_5) and reduction of area (Z). Hardness measurement was conducted with the use of hardness tester Zwick type 3212002/00. Microstructure tests were conducted on optical microscope type Olympus GX51 with magnification of 200–1000x and on scanning microscope Hitachi S-4200, with magnification of 5000–15000x. Quantitative assessment of pearlite microstructure was conducted with the use of specialised software (computer program “PILS” – Pearlite Inter-Lamellar Spacing [11]) with special focus on thickness of lamellae (λ_{sr}) and distance between cementite lamellae (l_{sr}). Images of microstructure were recorded in scanning microscope with magnification of 15000x. There were distances between cementite lamellae determined (l_{sr}), average thickness of lamellae (λ_{sr}) and variation index of those parameters.

Cooling rods made of steel 23MnB4 in air with the speed of about 5°C/s (Fig. 4a), provides formation of ferritic-pearlitic structure, confirmed by observed changes on registered cooling curve (Fig. 4b) and the observations of microstructure (Fig.5).

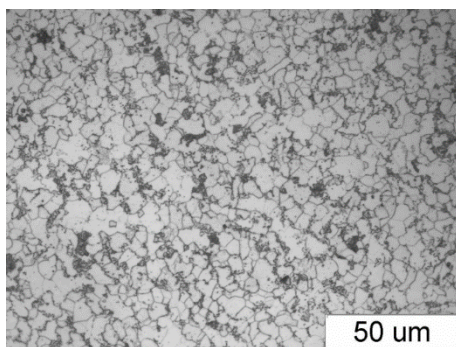
Wyniki ilościowej oceny mikrostruktury w zależności od temperatury i szybkości chłodzenia przedstawiono w tab. 2. Wraz z podwyższeniem temperatury walcowania od 750°C do 1020°C zwiększa się rozmiar ziarna ferrytu i kolonii perlitu. Próbkę po walcowaniu chłodzone wolno z piecem charakteryzują się większym rozmiarem ziarn ferrytu oraz kolonii perlitu. Stwierdzono nieznaczny wzrost ilości perlitu wraz z podwyższeniem temperatury końca walcowania i zwiększeniem szybkości chłodzenia.

Results of quantitative assessment of microstructure depending on temperature and cooling speed are presented in Tab. 2. With the increase of the rolling temperature from 750°C to 1020°C, the size of the ferrite and pearlite grain increases. Samples after rolling and slow cooling with the furnace are characterised by larger size of ferrite grains and pearlite colonies. A slight increase of pearlite quantity with the rise of the final rolling temperature and increase of cooling speed.

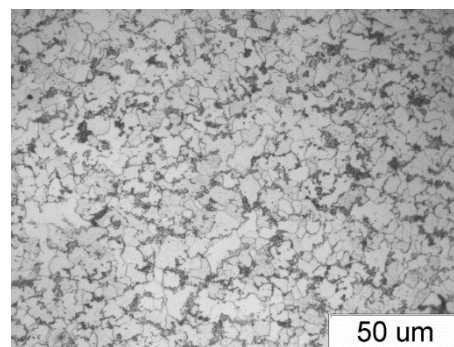


Rys. 4. Stal 23MnB4 (a) zmiany szybkości chłodzenia i temperatury, (b) przemiany na krzywej chłodzenia zarejestrowane za pomocą skanerów termowizyjnych dla pręta $\phi 9,8$ mm ze stali 23MnB4

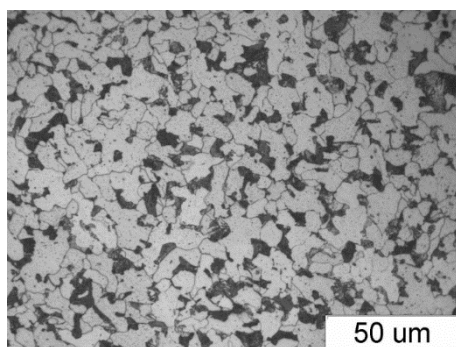
Fig. 4. 23MnB4 steel (a) changes in cooling speed and temperature, (b) changes on cooling curve registered with the use of thermovision scanners for a rod with $\phi 9.8$ mm made of 23MnB4 steel



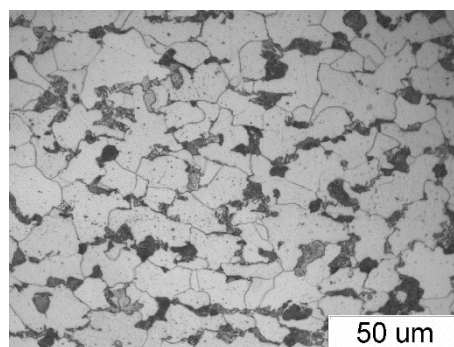
a) 750 (5°C/s)



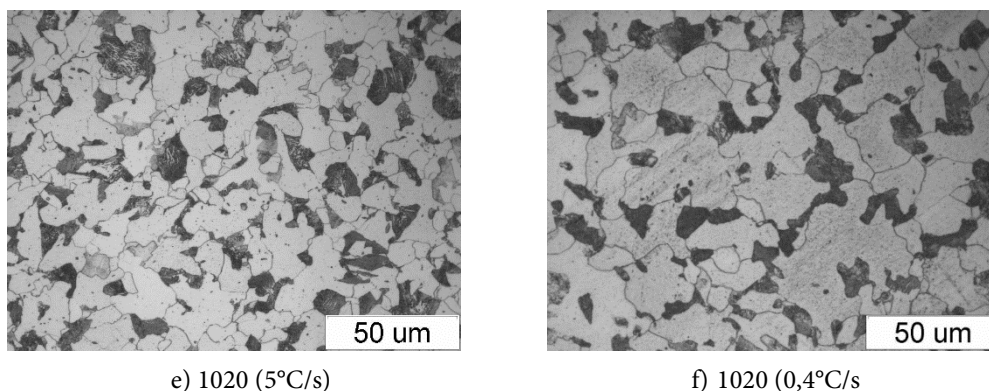
b) 750 (0,4°C/s)



c) 900 (5°C/s)



d) 900 (0,4°C/s)



e) 1020 (5°C/s)

f) 1020 (0,4°C/s)

Rys. 5. Mikrostruktura stali 23MnB4 w zależności od temperatury końca walcowania i szybkości chłodzenia: temperatura 750°C, 900°C i 1020°C – szybkość chłodzenia 5°C/s, 0,4°C/s (przekrój poprzeczny)

Fig. 5. Microstructure of 23MnB4 steel depending on final rolling temperature and cooling speed: temperature 750°C, 900°C and 1020°C, cooling speed 5°C/s, 0.4°C/s (cross section)

Tab. 2. Wyniki ilościowej oceny mikrostruktury walcówki ze stali 23MnB4

Tab. 2. The results of quantitative assessment of the microstructure of 23MnB4 steel wire

Temperatura walcowania/chłodzenia Temperature of rolling/cooling	Udział perlitu [%] Pearlite content [%]	Wielkość kolonii perlitu [μm] Size of pearlite colony [μm]	Wielkość ziarna ferrytu [μm] Size of ferrite grain [μm]
750 / (5°/s)	20,4	3,2	5,0
900 / (5°/s)	22,2	7,6	12,4
1020 / (5°/s)	25,7	10,2	16,8
750 / (0,4°/s)	18,2	4,3	7,8
900 / (0,4°/s)	21,1	9,1	13,0
1020 / (0,4°/s)	23,2	14,3	21,2

Wyniki badań właściwości mechanicznych próbek ze stali 23MnB4 zamieszczono w tab. 3. W próbkach chłodzonych po walcowaniu na powietrzu przebieg zmian właściwości jest monotoniczny. Największą granicę plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie mają próbki walcowane w temperaturze 750°C, zaś wytrzymałość na rozciąganie uzyskana po walcowaniu próbek w temperaturze 750°C i 900°C jest zbliżona. Wartości wydłużenia i przewężenia są porównywalne. Próbki chłodzone wolno z piecem wykazują niższe wartości wytrzymałości i granicy plastyczności w porównaniu do próbek chłodzonych z szybkością 5,0°C/s. Wytrzymałość maleje ze wzrostem temperatury, a wydłużenie jest zbliżone.

Chłodzenie prętów ze stali C70 na powietrzu z szybkością około 5°C/s zapewnia otrzymanie struktury perlitycznej z niewielkim udziałem ferrytu, o czym świadczą obserwowane przemiany na zarejestrowanej krzywej chłodzenia (rys. 6) oraz badania mikrostruktury (rys. 7).

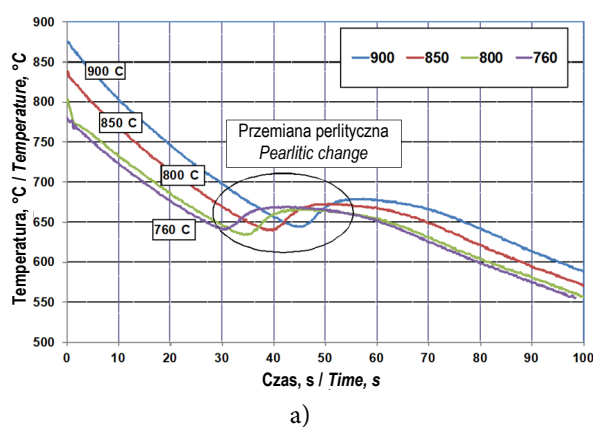
The results of the tests of mechanical properties of the 23MnB4 steel samples can be found in Table 3. In the samples cooled in air after rolling the course of property changes is monotonic. The highest yield point and tensile strength is that of the samples rolled at 750°C; the tensile strength of the samples rolled at 750°C and 900°C is similar. The values of elongation and reduction of area are comparable. The samples slowly cooled with the furnace have lower values of strength and yield point as compared to the samples at the speed of 5.0 °C/s. The strength decreases with the growth of temperature and elongation is similar.

Cooling of C70 steel rods in air, at the speed of about 5°C/s ensures obtaining of pearlitic structure with a small content ferrite, which is proved by the changes on the recorded cooling curve (Fig. 6) and by microstructure examinations (Fig. 7).

Tab. 3. Wyniki statycznej próby rozciągania próbek ze stali 23MnB4 walcowanych w temperaturze 750, 900 i 1020°C z chłodzeniem na powietrzu i z piecem

Tab. 3. The results of static tensile test of 23MnB4 steel samples rolled at the temperature of 750, 900 and 1020°C cooled in air and with furnace

Temperatura walcowania / szybkość chłodzenia Rolling temperature / cooling speed	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]
750 / (5°/s)	445	530	28,0	45,0
900 / (5°/s)	366	531	27,1	40,8
1020 / (5°/s)	356	512	27,8	44,2
750 / (0,4°/s)	380	494	29,5	48,0
900 / (0,4°/s)	322	478	29,2	37,0
1020 / (0,4°/s)	297	479	27,6	39,8



Temperatura walcowania [°C] Temperature of rolling [°C]	Przemiana perlityczna T, [°C] Pearlitic transformation T, [°C]		
	max. T	min. T	ΔT
900	679	644	35
850	673	640	33
800	665	634	31
760	669	641	28

Rys. 6. Zmiana temperatury w funkcji czasu (a) zarejestrowana za pomocą skanerów termowizyjnych, temperatura początku i końca przemiany perlitycznej, (b) dla prętów walcowanych ze stali C70D

Fig. 6. Temperature change as a function of time (a) recorded by means of thermovisions scanners, temperature of beginning and end of pearlite transformation, (b) for rolled rods of steel C70D

Parametry stereologiczne, w postaci wartości średnich lub rozkładów statystycznych pokazano w tab. 4 i na rys. 8. Największą czułość na zmiany parametrów procesu walcowania i chłodzenia wykazuje średnia odległość między płytkami cementytu (λ_{sr}) (rys. 8) oraz średnia grubość płytek cementytu (l_{sr}) (rys. 8). Stwierdzono, że najmniejsze odległości między płytkami cementytu uzyskuje się dla temperatury 850°C. Po walcowaniu w temperaturze 850°C płytki cementytu mają również najmniejszą grubość. Największe odległości oraz grubości płytek cementytu wykazywała próbka walcowana w temperaturze 750°C.

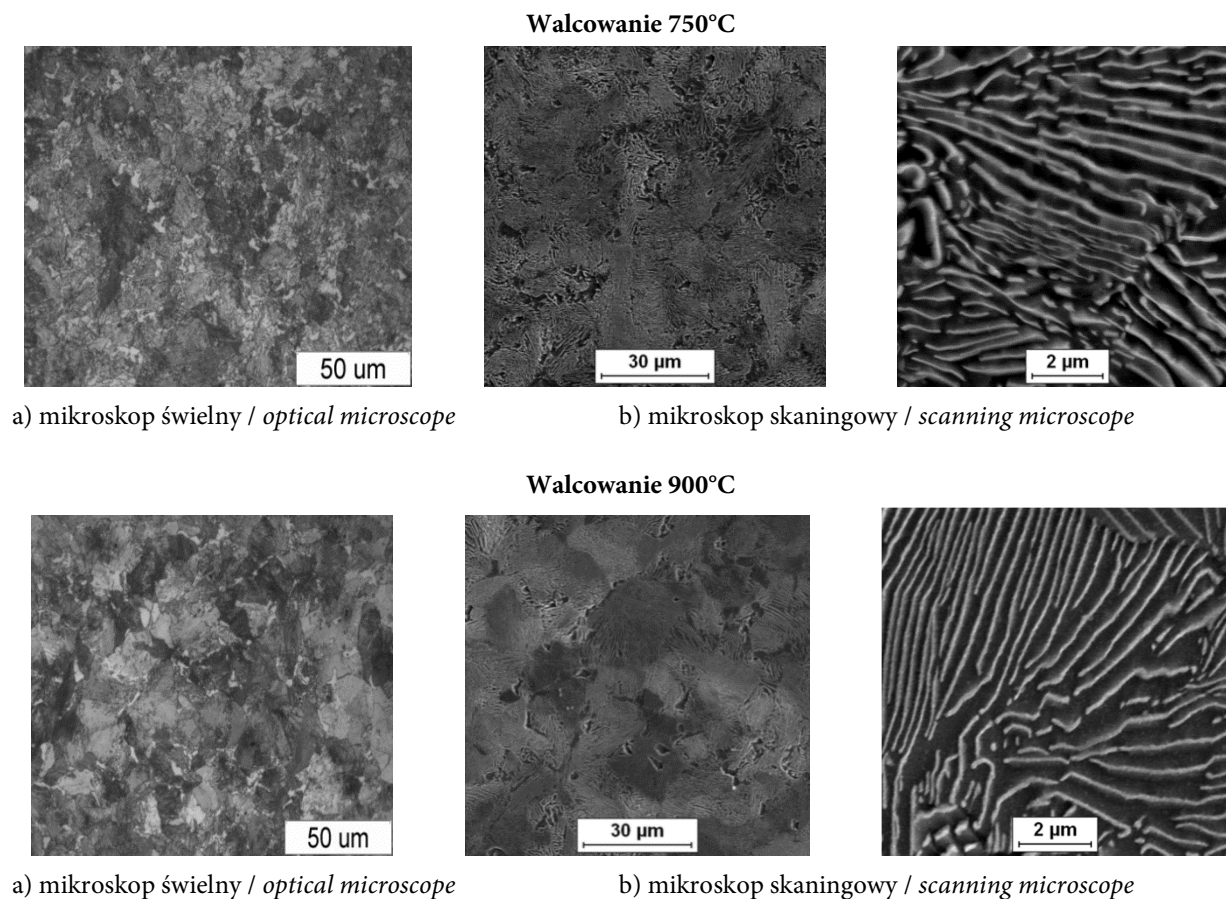
W tab. 5 zamieszczono wyniki badań właściwości mechanicznych próbek ze stali C70D chłodzonych początkowo na powietrzu, a następnie z piecem. Najwyższą granicę plastyczności i wytrzymałość mają próbki walcowane w temperaturze 850°C. Wraz z podwyższeniem tempe-

Stereological parameters in the form of average values or statistical distributions are shown in Tab. 4 and in Fig. 8. The largest sensitivity to the changes of the rolling and cooling parameters is that of the average distance between the cementite lamellae, (λ_{sr}) (Fig. 8). After rolling at the temperature of 850°C, the cementite lamellae have the least thickness. The largest distances and thickness of the cementite lamellae were found in the sampled rolled at the temperature of 750°C.

The results of examination of mechanical properties of the C70D steel cooled in air and then with the furnace can be seen in Tab. 5. The highest yield point and strength is that of the samples rolled at the temperature of 850°C. With the rolling temperature raise up to 900°C, the strength

ratury walcowania do 900°C właściwości wytrzymałościowe są mniejsze. Podobnie, z obniżeniem temperatury walcowania właściwości mechaniczne obniżają się. Wartości wydłużenia i przewężenia dla zastosowanych parametrów walcowania są zbliżone.

properties drop. Similarly, the mechanical properties go down with the reduction of the rolling temperature. The values of elongation and area reduction are similar.



Rys. 7. Mikrostruktura stali C70D po walcowaniu w temperaturze: 750°C i 900°C
Fig. 7. Microstructure of C70D steel after rolling at the temperatures of 750°C and 900°C

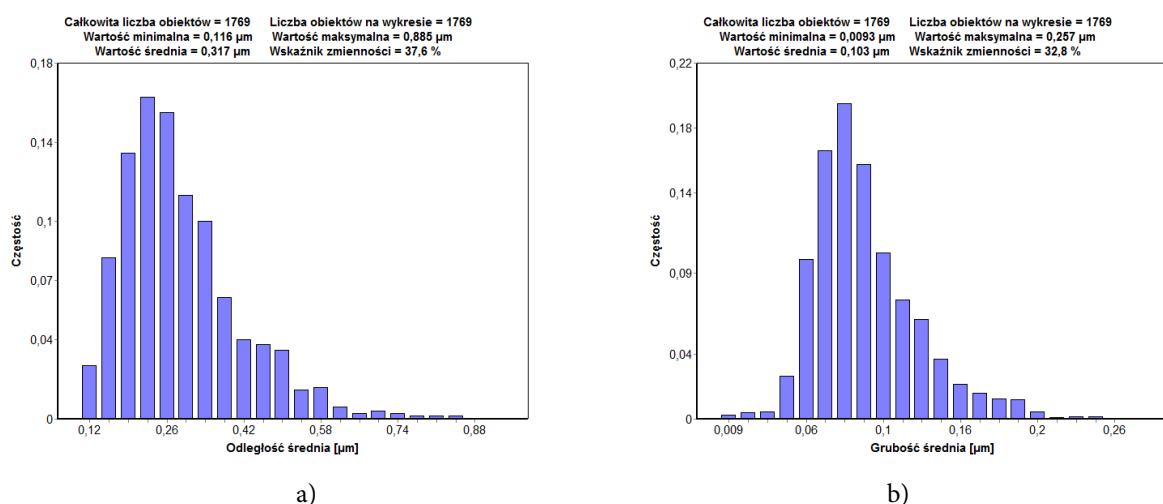
Tab. 4. Wyniki ilościowej oceny mikrostruktury perlitu
Tab. 4. Results of quantitative assessment of pearlite microstructure

Temperatura walcowania, [°C] Rolling temperature, [°C]	Średnia odległość międzyplątkowa (λ_{sr}) [μm] Average distance between lamellae (λ_{sr}) [μm]	Wskaźnik zmienności $v(\lambda_{sr})$ [%] Index of variation $v(\lambda_{sr})$ [%]	Średnia grubość płytek cementytu (λ_{sr}) [μm] Average thickness of the cementite lamellae (λ_{sr}) [μm]	Wskaźnik zmienności $v(\lambda_{sr})$ [%] Index of variation $v(\lambda_{sr})$ [%]
760	0,422	32,4	0,124	36,5
800	0,382	34,5	0,113	33,0
850	0,317	37,6	0,103	32,8
900	0,378	35,3	0,120	35,1

Tab. 5. Wyniki statycznej próby rozciągania oraz twardości (HV1) próbek ze stali C70D walcowanych w temperaturze 750, 800, 850 i 900°C z chłodzeniem początkowo na powietrzu i z piecem

Tab. 5. Results of statical tensile test and hardness (HV1) of C70D steel samples rolled at the temperature of 750, 800, 850 and 900°C cooled initially in air and with the furnace

Temperatura walcowania [°C] Rolling temperature [°C]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$R_{p0.2}/R_m$ [%]	A_5 [%]	Z [%]	HV1
750	563	900	62,2	16,5	42,3	271
800	595	932	63,7	13,2	41,2	265
850	626	967	64,7	15,1	38,9	293
900	615	946	65,1	14,0	41,5	262



Rys. 8. Rozkład częstości występowania odległości między płytkami cementytu i grubości płytek cementytu w mikrostrukturze stali walcowanej w temperaturze 850°C

Fig. 8. Distribution of occurrence frequency of distance between cementite lamellae and cementite lamellae thickness in the microstructure of steel rolled at the temperature of 850°C

Na właściwości mechaniczne istotnie wpływa wielkość przechłodzenia (tab. 6). Wraz ze zwiększeniem przechłodzenia z temperatury 920°C do zakresu 665°C–580°C obserwuje się wzrost wytrzymałości próbek przy nieznacznym obniżeniu plastyczności. Dalsze zwiększanie przechłodzenia z temperatury 920°C do 420°C prowadzi do utraty plastyczności badanej stali.

The mechanical properties are significantly influenced by the magnitude of overcooling (Tab. 6). With the increase of overcooling from the temperature of 920°C down to the range of 665°C–580°C, an increase of the sample strength can be observed with a slight deterioration of plasticity. Further increase of overcooling from the temperature of 920°C down to 420°C results in the loss of plasticity of the steel under investigation.

Tab. 6. Wyniki statycznej próby rozciągania oraz twardości (HV1) próbek ze stali C70D walcowanych w 920°C z chłodzeniem początkowo prysznicem wodnym do temperatury 665°C, 655°C, 650°C, 625°C, 580°C, 420°C i <400°C, a następnie z piecem

Przechłodzenie, [°C/s] / Overcooling [°C/s]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$R_{p0.2}/R_m$ [%]	A_5 [%]	Z [%]	HV1
920→665	800	980	0,82	20,5	31,2	230
920→655	750	1030	0,73	19,5	36,2	245
920→625	790	1085	0,73	18,5	31,9	258
920→580	815	1125	0,72	18,0	36,5	262

Przechłodzenie, [°C/s] / Overcooling [°C/s]	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	R _{p0.2} /R _m [%]	A ₅ [%]	Z [%]	HVI
920→420	1027	1200	0,86	9,2	22,5	320
920→<400	– zniszczenie przy 1400MPa / failure at 1400 MPa					

Z prętów po walcowaniu pobrano próbki o wymiarach $\phi 8 \times 12$ mm, które spęczano do 1/3 (odkształcenie 33%) i do 2/3 wysokości (odkształcenie 66%). Badania wykonano na prasie ZDJT 30 o maksymalnym nacisku 3 MN. Dla wszystkich wykonanych wariantów walcowania stali 23MnB4 i C70D nie stwierdzono obecności wad powierzchniowych, co klasyfikuje pozytywnie walcowane pręty ze stali 23MnB4 według tego kryterium odbioru.

4. PRZEMYSŁOWE PRÓBY WALCOWANIA

Badania przemysłowe przeprowadzono na linii walcowniczej z układem chłodzenia Stelmor dla czterech kęsów ze stali 23MnB4 i czterech kęsów ze stali C70. Temperatura w piecu wynosiła $1150 \pm 20^\circ\text{C}$, a prędkość wyjściowa pasma z ostatniej klatki bloku RSM 100 m/s. W tab. 7 i 8 podano cztery warianty walcowania przy zastosowaniu dwóch temperatur końca walcowania oraz trzech szybkości chłodzenia, regulowanych za pomocą włączonych/wyłączonych wentylatorów oraz podniesionych/opuszczonych pokryw w części chłodzącej Stelmor. Kęs nr 4 był walcowany wg aktualnej technologii zakładu (AKT).

Samples with the dimensions of $\phi 8 \times 12$ mm have been taken from rolled rods; the samples have been upset to 1/3 (deformation 33%) and to 2/3 of height (deformation 66%). Test were performed on a ZDJT press with maximum capacity of 3 MN. In all the executed variants of rolling 23MnB4 and C70D steel, no surface defects have been found, which is a positive test result of rolled 23MnB4 steel rods according to this criterion of acceptance.

4. INDUSTRIAL ROLLING TESTS

Industrial tests have been performed on a rolling line with Stelmor cooling system for four billets of 23MnB4 steel and four ones of C70 steel. The temperature in the furnace was $1150 \pm 20^\circ\text{C}$ and the output speed from the last cage of the block was 100 m/s. In Tab. 7 and 8, one can see four variants of rolling with the application of two rolling end temperatures and three cooling speeds by means of ventilators switched on/off and raised/ lowered covers in the cooling part of Stelmor. Billet no. 4 was rolled according to the current technology of the plant (AKT).

Tab. 7. Parametry walcowania oraz chłodzenia stali 23MnB4

Tab. 7. Rolling and cooling parameters of 23MnB4 steel

Nr kęsa / No. of billet	1	2	3	4 – AKT
Temperatura na wejściu w NTM <i>Temperature at input in NTM</i>	850°C	850°C	850°C	850°C
Temperatura na wejściu w RSM <i>Temperature at input in RSM</i>	990°C	850°C	850°C	800°C
Temperatura na wyjściu układacza zwojów <i>Temperature at the loop layer output</i>	1030°C	750°C	750°C	750°C
Wentylatory <i>Ventilators</i>	wyłączone <i>off</i>	wyłączone <i>off</i>	włączone <i>on</i>	wyłączone <i>off</i>
Pokrywy <i>Covers</i>	opuszczone <i>lowered</i>	podniesione <i>raised</i>	podniesione <i>raised</i>	opuszczone <i>lowered</i>
Szybkość chłodzenia <i>Cooling speed</i>	mała <i>low</i>	średnia <i>medium</i>	duża <i>high</i>	mała <i>low</i>

Tab. 8. Warunki obróbki cieplno-plastycznej stali C70D walcowanej na linii przemysłowej

Tab. 8. Conditions of heat-plastic treatment of C70D steel rolled on the industrial line

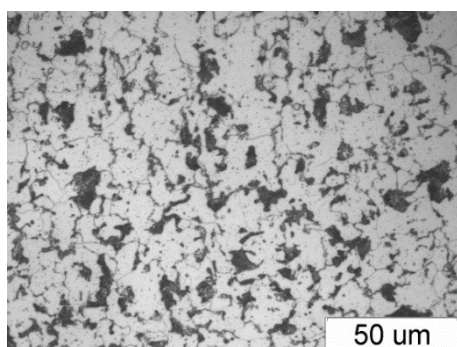
Temperatura końca walcowania / szybkość chłodzenia / Rolling end temperature/ cooling speed
Kęsa nr 1 – wariant W1 / Billet no.1 – variant W1 Temp. końca walcowania 850°C, wszystkie wentylatory włączone (duża szybkość chłodzenia) Rolling end temperature 850°C, all ventilators on (high cooling speed)
Kęsa nr 2 – wariant W2 / Billet no.2 – variant W2 Temp. końca walcowania 760°C, wszystkie wentylatory włączone (duża szybkość chłodzenia) Rolling end temperature 760°C, all ventilators on (high cooling speed)
Kęsa nr 3 – wariant W3 / Billet no.3 – variant W3 Temp. końca walcowania 850°C, pokrywy częściowo otwarte (średnia szybkość chłodzenia) Rolling end temperature 850°C, covers partially open (medium cooling speed)
Kęsa nr 4 – wariant W4 (obecnie stosowana technologia) / Billet no.4 – variant W4 (currently applied technology) Temp. końca walcowania 920°C, pokrywy częściowo otwarte (średnia szybkość chłodzenia) Rolling end temperature 920°C, covers partially open (medium cooling speed)

Wyniki badań mikrostruktury stali 23MnB4 pokazano na rys. 9 oraz w tab. 9, w której zestawiono wyniki ilościowej oceny mikrostruktury dla stosowanych wariantów obróbki cieplno-plastycznej badanej stali. Największe rozdrobnienie struktury obserwowano na walcówce otrzymanej z kęsa nr 3, przy której zastosowano temperaturę końca walcowania 750°C oraz największą szybkość chłodzenia (wentylatory włączone, pokrywy podniesione).

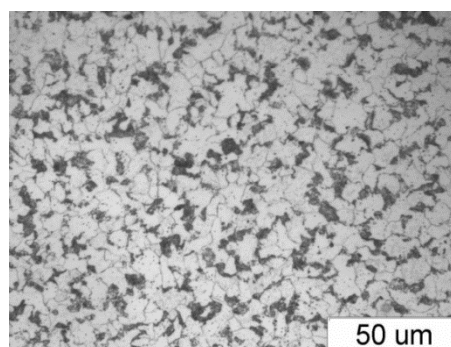
Wielkości ziaren walcówki z kęsa nr 2 i 4 są zbliżone do siebie natomiast z kęsa nr 1 charakteryzuje się największym ziarnem. Obserwacje mikrostruktury na zglądzie wzdłużnym próbki wskazują strukturę pasmową zgodną z kierunkiem walcowania. Przeprowadzone badania przemysłowe potwierdzają wcześniejsze obserwacje, że zastosowanie przyspieszonego chłodzenia (podniesione pokrywy i włączone wentylatory) umożliwia obniżenie średniego rozmiaru ziarn ferrytu oraz kolonii perlitu.

The results of 23MnB4 steel microstructure examination can be found in Fig. 9 and in Tab. 9 in which the results of quantitative assessment of the microstructure for the applied variants of the heat-plastic treatment of the steel under examination have been assembled. Most break-up of the structure has been found in the wire rod obtained from billet no. 3 where the rolling end temperature of 750°C and the highest cooling speed had been applied (ventilators on, covers open).

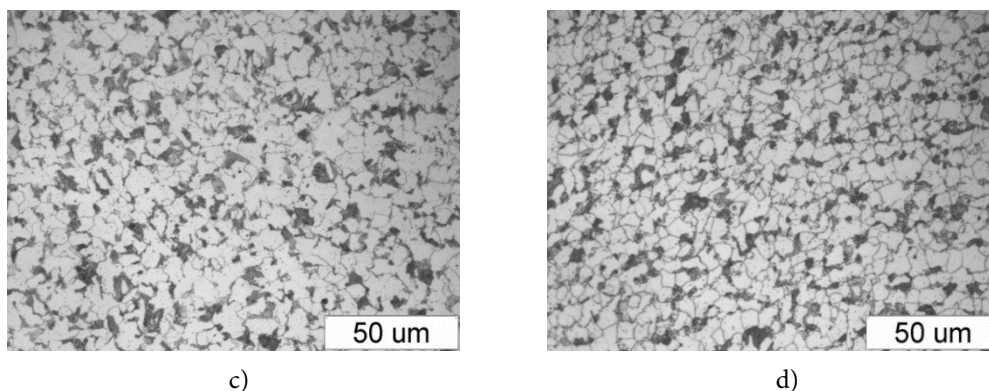
The grain size of the wire rod from billet no. 2 and 4 are similar to each other, the one from billet no. 1 has the largest grain. Microstructure inspections on a longitudinal microsection of the sample show band structure in accordance with the rolling direction. Industrial tests prove that the application of accelerated cooling (covers up and ventilators on) make it possible to reduce the average size of the ferrite grains and pearlite colonies.



a)



b)



Rys. 9. Mikrostruktura stali 23MnB4 po walcowaniu i chłodzeniu w warunkach przemysłowych (przekrój poprzeczny): a) – temperatura końca walcowania 1030°C, mała szybkość chłodzenia (wariant 1); b) – temperatura 750°C, mała szybkość chłodzenia (wariant 2); c) – temperatura 750°C, duża szybkość chłodzenia (wariant 3); d) – temperatura 750°C, szybkość chłodzenia (wariant 4)

Fig. 9. Microstructure of 23MnB4 steel after rolling and cooling in industrial conditions (cross section): a) – rolling end temperature 1030°C, low cooling speed (variant 1); b) – temperature 750°C, low cooling speed (variant 2); c) – temperature 750°C, high cooling speed (variant 3); d) – temperature 750°C, cooling speed (variant 4)

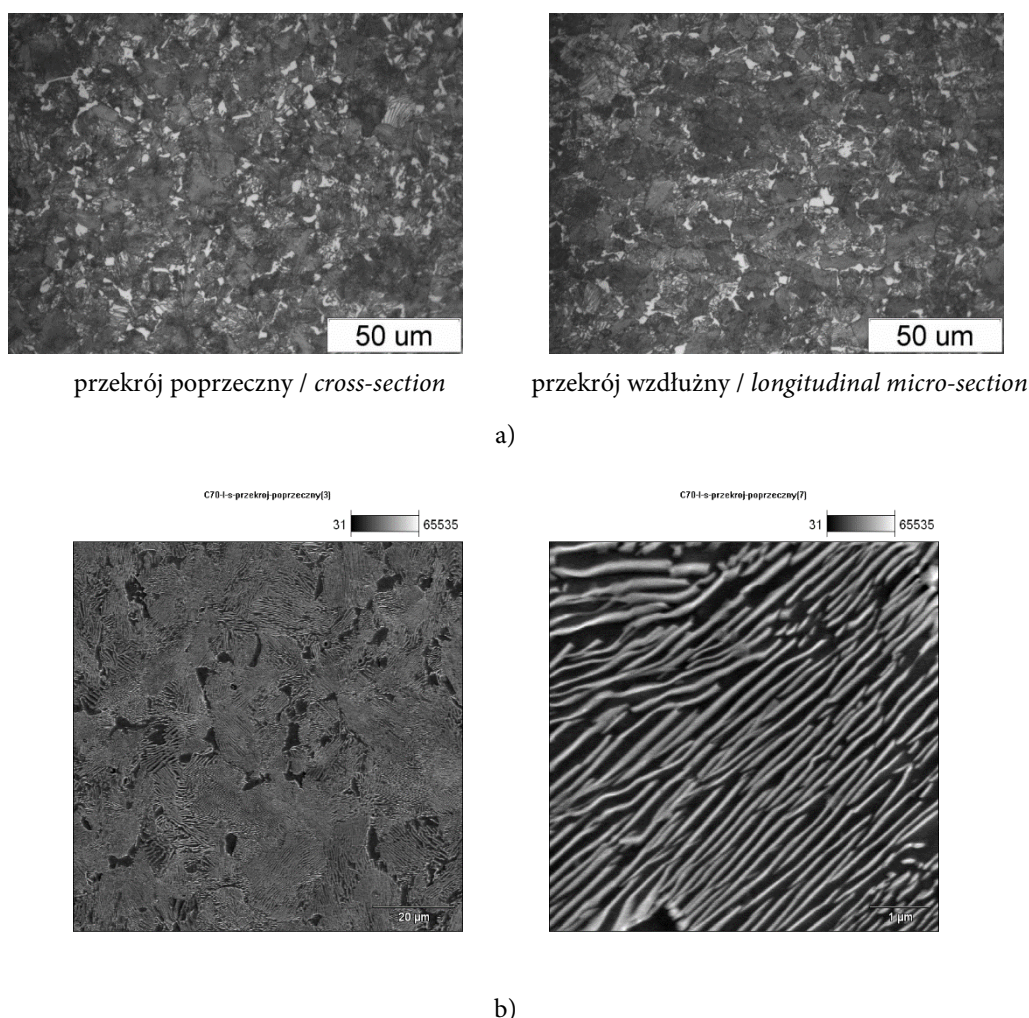
Tab. 9. Zestawienie wyników ilościowej oceny mikrostruktury dla stosowanych wariantów obróbki cieplno-plastycznej stali 23MnB4

Tab. 9. Assembly of the results of quantitative assessment of microstructure for the applied variants of heat-plastic treatment of the 23MnB4 steel

Temp. końca walcowania [°C] Rolling end temp. [°C]	Szybkość chłodzenia Cooling speed	Udział perlitu [%] Pearlite content [%]	Średni rozmiar kolonii perlitu D_p [μm] Average size of pearlite colony D_p [μm]	Średni rozmiar ziarna ferrytu D_f [μm] Average size of ferrite grain D_f [μm]
1030	mała / low	22,4	19,4	21,2
750	średnia / medium	19,2	4,3	5,2
750	duża / high	20,3	5,5	6,4
750	mała / low	21,3	7,4	9,6

Przykładowe wyniki badań mikrostruktury stali C70 po procesie obróbki cieplno-plastycznej z zastosowaniem mikroskopii świetlnej i skaningowej dla najbardziej korzystnego wariantu walcowania pokazano rys. 10. Mikrostruktura składa się z kolonii perlitu o równomiernej budowie perlitu bez defragmentacji oraz niewielkiej ilości ferrytu w postaci siatki. Na przekroju wzdłużnym nie stwierdzono pasmowości mikrostruktury.

Examples of the results of C70 steel microstructure examination after the process of heat-plastic treatment, with the use of optical and scanning microscopy, for the most advantageous variant of rolling, can be seen in Fig. 10. The microstructure consists of pearlite colonies, with even pearlite structure without defragmentation, and a small quantity of ferrite in the form of network. No structure banding has been found in the longitudinal section.



Rys. 10. Mikrostruktury stali C70D po walcowaniu według wariantu 1 (**temp. końca walcowania 850°C**, wszystkie wentylatory włączone (**duża szybkość chłodzenia**) na przekroju poprzecznym i wzdłużnym zarejestrowane na mikroskopie świetlnym (a), obrazy zarejestrowane na mikroskopie skaningowym (b)

Fig. 10. Microstructures of C70D steel after rolling according to variant 1 (rolling end temperature 850°C, all ventilators on (high cooling speed) on cross and longitudinal section recorded on an optical microscope (a), images recorded on a scanning microscope (b)

Wyniki ilościowej oceny struktury po procesie walcowania pokazano w tab. 10. Najmniejszą odległość międzypłytkową mają próbki po walcowaniu z temperatury końca procesu 760°C. Po uwzględnieniu innych właściwości optymalnym z zastosowanych wariantów jest wariant W1 (temp. końca walcowania 850°C, wszystkie wentylatory włączone).

The results of quantitative assessment of the structure after the process of rolling can be seen in Tab. 10. The least distance between the lamellae is that of the samples after rolling of the process end temperature of 760°C. After incorporation of other properties, the optimum variant is W1 (rolling end temperature 850°C, all ventilators on).

Tab. 10. Wyniki ilościowej oceny mikrostruktury stali C70D po walcowaniu w warunkach przemysłowych
 Tab. 10. The results of quantitative assessment of the structure of C70D steel after rolling in industrial conditions

	Średnia odległość między płytkami cementytu λ_{sr} , [μm] Average distance between cementite lamellae λ_{sr} , [μm]	Wskaźnik zmienności [%] Variation index [%]	Średnia grubość Płytek cementytu d_{sr} [μm] Average thickness of cementite lamellae d_{sr} [μm]	Wskaźnik zmienności [%] Variation index [%]
Kęs nr 1 – wariant W1 temp. końca walcowania 850°C, wszystkie wentylatory włączone Billet no. 1 – variant W1 rolling end temp. 850°C, all ventilators on	0,219	28,1	0,062	28,9
Kęs nr 2 – wariant W2 temp. końca walcowania 760°C, wszystkie wentylatory włączone Billet no. 2 – variant W2. rolling end temp. 760°C, all ventilators on	0,195	29,2	0,065	29,5
Kęs nr 3 – wariant W3 temp. końca walcowania 850°C, pokrywy częściowo otwarte Billet no. 3 – variant W3 rolling end temp. 850°C, covers partially open	0,221	35,8	0,065	24,9
Kęs nr 4 – wariant W4 temp. końca walcowania 920°C, pokrywy częściowo otwarte Billet no. 4 – variant W4 rolling end temp. 920°C, covers partially open	0,235	38,1	0,071	28,6

5. PODSUMOWANIE

W przedstawionych badaniach modelowych i przemysłowych potwierdzono istotny wpływ parametrów walcowania i warunków chłodzenia na strukturę i właściwości mechaniczne walcówki ze stali ferrytyczno-perlitycznej i perlitycznej przeznaczonej do kształtowania objętościowego na zimno. W badaniach plastometrycznych wykazano, że badane stale 23MnB4, 30MnB4, C45 i C70D charakteryzują się dużą odkształcalnością, sięgającą wartości odkształcenia granicznego ε_g powyżej wartości 20 w najniższej temperaturze odkształcania i ciągłym zwiększaniem odkształcalności ze wzrostem temperatury. Maksymalne

5. SUMMARY

The presented model and industrial tests have proved significant influence of the rolling parameters and cooling conditions on the structure and mechanical properties of wire rod made of ferritic-pearlitic and pearlitic steel intended for volumetric cold forming. Plastometric tests have shown that the tested steels, 23MnB4, 30MnB4, C45 and C70D have high deformability of as much as the value of deformation limit, ε_g , above 20 in the lowest deformation temperature, as well as continuous increase of deformability with the rise of the temperature. The maximum yield stress is slightly varies depending on the steel grade; it is

napężenie uplastyczniające w małym stopniu jest zróżnicowane w zależności od rodzaju stali, a w większym stopniu zależy od temperatury i prędkości odkształcania. W przeprowadzonych badaniach modelowych i przemysłowych stali 23MnB4 wykazano, że stosowanie obniżonej temperatury walcowania oraz większej szybkości chłodzenia pozwala otrzymać walcówkę o wyższej granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie bez utraty plastyczności. Szczególnie znaczący wzrost uzyskuje się po obniżeniu temperatury walcowania do 750°C. Prawdopodobnie poprawiony proces wytwarzania walcówki do spęczania na zimno ze stali 23MnB4 powinien pozwolić na otrzymanie materiału, który poddany próbie spęczania zapewni własności gotowego wyrobu w zakresie względnego odkształcenia plastycznego na poziomie około 33% (2/3 wysokości początkowej). Jednak w związku ze stale rosnącymi wymaganiami odbiorców należy dążyć do ciągłej poprawy własności produkowanej walcówki – nawet do spęczania do 1/3 wysokości początkowej 66%. Zastosowanie temperatury 750°C, a więc niższej od stosowanej na linii Stelmor oraz wyższej szybkości chłodzenia umożliwia otrzymanie wysokiej wytrzymałości, przy niezmiętej plastyczności. Tym samym zapewnia spełnienie kryterium wartości gniotu równego 66% przy spęczaniu bez pęknięć. W przeprowadzonych badaniach stali C70 stwierdzono, że po walcowaniu w temperaturze 850°C z następnym chłodzeniem na powietrzu do temperatury 550°C można uzyskać podwyższenie granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie bez utraty plastyczności. Odkształcanie w tej temperaturze prowadzi do uzyskania mikrostruktury perlitu o średniej odległości między płytkami cementytu (λ_{sr}) oraz średniej grubości płytek cementytu (l_{sr}) zbliżonej do oczekiwanych.

Zastosowanie temperatury walcowania 850°C, a więc niższej od stosowanej na linii Stelmor, umożliwia otrzymanie wysokiej wytrzymałości, przy niezmiętej plastyczności.

PODZIĘKOWANIA

Praca realizowana w ramach projektu: PBS2/A5/32/2013 – Innowacyjna i proekologiczna technologia obróbki pozapiecowej ciągłego odlewania

more dependent on the deformation temperature and speed. Model and industrial tests of 23MnB4 steel have shown that the application of lowered temperature and higher cooling speed allows for obtaining wire rod with higher yield point and tensile strength without the loss of plasticity. Specially significant increase is obtained after reduction of the rolling temperature down to 750°C. Correctly performed process of manufacturing 23MnB4 steel wire rod for cold upsetting should allow for obtaining material which, subjected to upsetting test will ensure properties of the ready-made product within the range of true plastic strain at the level of about 33% (2/3 of the initial height). However, due to the growing recipients' requirements, attempts should be made at continuous improvement of manufactured wire rod, even to upsetting to 1/3 of the initial height 66%. The application of the temperature of 750°C, i.e. lower than that used on the Stelmor line, and higher cooling speed, makes it possible to obtain high strength with unchanged plasticity. Consequently, it meets the criterion of strain of 66% when upsetting with no cracks. In the tests of C70 steel, it has been determined that, after rolling at 850°C followed by cooling in air down to the temperature of 550°C, raise of the yield point and tensile strength can be obtained without loss of plasticity. Deformation at this temperature results in microstructure of pearlite with average distance between the cementite lamellae (λ_{sr}) and average cementite lamellae thickness (l_{sr}) close to the expected ones.

The application of the rolling temperature of 850°C, i.e. lower than that used in the Stelmor line, makes it possible to obtain high strength with unchanged plasticity.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is realised within the project: PBS2/A5/32/2013 – Innovative and pro-ecological technology of secondary metallurgy, continuous casting

oraz walcowania nowych rodzajów walcówki wysokowęglowej i o zwiększonej plastyczności do odkształcania na zimno w walcowniach ciągłych z wieloetapowym chłodzeniem.

and rolling of new types of high-carbon steel rod and increased plasticity for cold deformation in continuous rolling mills with multi-stage cooling

LITERATURA

- [1] Grosman Franciszek, Dariusz Woźniak. 2001. „Nowoczesne linie walcowania walcówki”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* (3): 97–104.
- [2] Laber Konrad, Henryk Dyja, Bartosz Koczurkiewicz. 2015. “Analysis of industrial conditions during multi-stage cooling of C70D high-carbon steel wire rod”. *Materials Testing* 57 (4): 301–305.
- [3] Grosman Franciszek, Eugeniusz Hadasik. 2005. *Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [4] Hadasik Eugeniusz, Adam Płachta, Dariusz Kuc, Grzegorz Niewielski. 2006. „Badania plastyczności stali przeznaczonych do walcowania walcówki”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 334–336.
- [5] Hadasik Eugeniusz, Adam Płachta, Marek Tkocz, Grzegorz Niewielski, Kazimierz Ducki. 2014. „Badania plastometryczne metodą skręcania stali przeznaczonych do walcowania walcówki”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 9: 579–583.
- [6] Schindler Ivo, Jozef Boruta. 1994. „Obliczanie i zastosowanie energii aktywacji dla procesu przeróbki plastycznej na gorąco”. *Archives of Metallurgy* 4: 471–491.
- [7] Schindler Ivo, Josef Boruta. 1998. *Utilization Potentials of the Torsion Plastometer*. Silesian University of Technology.
- [8] Kuc Dariusz, Grzegorz Niewielski, Iwona Bednarczyk, Ivo Schindler. 2016. „Wpływ temperatury walcowania i warunków chłodzenia na właściwości i strukturę stali 23MnB4 przeznaczonej do spęczania na zimno”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 413–415.
- [9] Kuc Dariusz, Janusz Szala, Iwona Bednarczyk. 2016. „Wpływ temperatury walcowania na właściwości i mikrostrukturę stali C70 przeznaczonej na walcówkę”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 348–350.
- [10] Kuc Dariusz, Szala Janusz, Niewielski Grzegorz. 2017. „Wpływ obróbki cieplnej i plastycznej na mikrostrukturę i właściwości stali C70D”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 397–399.
- [11] Szala Janusz, Dariusz Kuc. 2015. „Określenie morfologii mikrostruktury stali perlitycznej walcowanej na gorąco”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 499–504.

REFERENCES

- [1] Grosman Franciszek, Dariusz Woźniak. 2001. „Nowoczesne linie walcowania walcówki”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* (3): 97–104.
- [2] Laber Konrad, Henryk Dyja, Bartosz Koczurkiewicz. 2015. “Analysis of industrial conditions during multi-stage cooling of C70D high-carbon steel wire rod”. *Materials Testing* 57 (4): 301–305.
- [3] Grosman Franciszek, Eugeniusz Hadasik. 2005. *Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [4] Hadasik Eugeniusz, Adam Płachta, Dariusz Kuc, Grzegorz Niewielski. 2006. „Badania plastyczności stali przeznaczonych do walcowania walcówki”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 334–336.
- [5] Hadasik Eugeniusz, Adam Płachta, Marek Tkocz, Grzegorz Niewielski, Kazimierz Ducki. 2014. „Badania plastometryczne metodą skręcania stali przeznaczonych do walcowania walcówki”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 9: 579–583.
- [6] Schindler Ivo, Jozef Boruta. 1994. „Obliczanie i zastosowanie energii aktywacji dla procesu przeróbki plastycznej na gorąco”. *Archives of Metallurgy* 4: 471–491.
- [7] Schindler Ivo, Josef Boruta. 1998. *Utilization Potentials of the Torsion Plastometer*. Silesian University of Technology.
- [8] Kuc Dariusz, Grzegorz Niewielski, Iwona Bednarczyk, Ivo Schindler. 2016. „Wpływ temperatury walcowania i warunków chłodzenia na właściwości i strukturę stali 23MnB4 przeznaczonej do spęczania na zimno”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 413–415.
- [9] Kuc Dariusz, Janusz Szala, Iwona Bednarczyk. 2016. „Wpływ temperatury walcowania na właściwości i mikrostrukturę stali C70 przeznaczonej na walcówkę”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 348–350.
- [10] Kuc Dariusz, Szala Janusz, Niewielski Grzegorz. 2017. „Wpływ obróbki cieplnej i plastycznej na mikrostrukturę i właściwości stali C70D”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 397–399.
- [11] Szala Janusz, Dariusz Kuc. 2015. „Określenie morfologii mikrostruktury stali perlitycznej walcowanej na gorąco”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 499–504.

