

Krzysztof RADWAŃSKI, Jerzy WIEDERMANN

Instytut Metalurgii Żelaza

Andrzej ADAMIEC

Przeróbka Plastyczna na Zimno – Baildon Sp. z o.o.

Jarosław GAZDOWICZ

Instytut Metalurgii Żelaza

## WPLYW PARAMETRÓW OBRÓBKI CIEPLNEJ TAŚM ZE STALI X6CR17 NA ICH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I STRUKTURĘ

*Celem pracy było określenie wpływu parametrów wyżarzania taśm po walcowaniu na zimno, wykonanych ze stali X6Cr17 na ich właściwości mechaniczne i strukturę. Obróbkę cieplną taśm o grubości 0,12 mm w stanie utwardzonym dostarczonych przez Przeróbkę Plastyczna na Zimno-Baildon Sp. z o.o. wykonano w warunkach laboratoryjnych w zakresie temperatury wyżarzania 750÷1100°C. Wyżarzanie taśm w zakresie temperatur 750÷900°C powoduje uzyskanie struktury ferrytycznej. Po studzeniu taśm wyżarzanych w temperaturach 950÷1100°C w strukturze uzyskano oprócz ferrytu również martenzyt. Powoduje to znaczny przyrost wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności taśm. Średnia średnica równoważna ziarna ferrytu w badanym zakresie temperatury wyżarzania rośnie z 4,17 do 9,66 μm.*

*Słowa kluczowe: taśma zimnowalcowana, stal ferrytyczna X6Cr17, obróbka cieplna, właściwości mechaniczne, mikrostruktura, EBSD*

## THE EFFECT OF HEAT TREATMENT PARAMETERS OF X6CR17 STEEL STRIPS ON THEIR MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE

*The purpose of the work was to determine the effect of annealing parameters of cold-rolled X6Cr17 steel strips on their mechanical properties and structure. The heat treatment of 0.12 mm strips in hardened state delivered by Przeróbka Plastyczna na Zimno Baildon Sp. z o.o. was carried out under laboratory conditions within the annealing temperature range of 750÷1100°C. The annealing of strips within the temperature range of 750÷900°C results in obtaining ferritic structure. After cooling of strips annealed at 950÷1100°C, in addition to ferrite also martensite was obtained in the structure. It results in significant increase in tensile strength and yield point of strips. The average equivalent diameter of ferrite grain within the investigated range of annealing temperature increases from 4,17 μm to 9,66 μm.*

*Key words: cold-rolled strip, ferritic steel X6Cr17, heat treatment, mechanical properties, microstructure, EBSD*

### 1. WSTĘP

Wykonane w ostatnich latach badania rynku wykazały rosnące zapotrzebowanie na taśmy ze stali odpor-nych na korozję. Szczególne zapotrzebowanie istnieje na super cienkie taśmy walcowane na zimno o grubościach  $\leq 0,1$  mm, przeznaczone między innymi na wkładki do taśm z tworzyw sztucznych stosowanych do oznakowania podziemnej infrastruktury przesyłowej takich jak m.in.: kable światłowodowe, sieci gazowe i wodociągowe. W ostatnich latach notowany jest znaczny wzrost inwestycji w sektorach telekomunikacji, gazownictwa, wodociągach i energetyce, pociągający za sobą coraz gęstsze uzbrojenie terenu w różnego

rodzaju sieci, przede wszystkim z tworzyw sztucznych. Powoduje to duże trudności w lokalizacji właściwych kabli i rurociągów podczas prowadzonych prac ziemnych przy realizacji różnego rodzaju inwestycji czy remontów.

W Polsce produkowane są obecnie jedynie taśmy walcowane na zimno ze stali konstrukcyjnych, sprężynowych i narzędziowych zarówno o prostych jak i kształtowych narożach [1, 2]. W związku z istniejącym zapotrzebowaniem na super cienkie taśmy ze stali odpor-nych na korozję Przeróbka Plastyczna na Zimno – Baildon Sp. z o.o. wspólnie z Instytutem Metalurgii

Żelaza podjęła próbę uruchomienia produkcji takich taśm.

Uruchomienie produkcji super cienkich taśm ze stali odpornych na korozję wymaga opracowania parametrów ich przeróbki plastycznej, obróbki cieplnej, a w konsekwencji całej technologii wytwarzania.

Obróbkę cieplną taśm walcowanych na zimno o grubości 0,12 mm przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych w zakresie temperatury 750÷1100°C. Taśmy o grubości 0,12 mm stanowią półprodukt w procesie wytwarzania super cienkich taśm o grubościach poniżej 0,1 mm. Walcowanie taśmy o grubości 0,12 mm na grubość poniżej 0,1 mm wymaga jej uplastycznienia, za pomocą obróbki cieplnej.

W ramach pracy wyznaczono wpływ temperatury wyżarzania na właściwości mechaniczne i strukturę taśm ze stali X6Cr17.

## 2. MATERIAŁ, ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Materiał do badań stanowiły taśmy ze stali X6Cr17 zawierające: 0,039% C, 15,37% Cr, 0,029% P, 0,003% S. W stanie wyjściowym do obróbki cieplnej, tj. po walcowaniu na zimno wykonanym w warunkach przemysłowych Przeróbki Plastycznej na Zimno – Baildon Sp. z o.o., taśma charakteryzowała się następującymi właściwościami mechanicznymi  $R_{p0,2} = 929$  MPa i  $R_m = 957$  MPa. W ramach pracy wykonano próby laboratoryjne obróbki cieplnej taśm o grubości 0,12 mm, szerokości 70 mm i długości 120 mm w stanie po walcowaniu na zimno. Wyznaczono wpływ temperatury wyżarzania na właściwości mechaniczne i strukturę taśm ze stali X6Cr17.

Obróbka cieplna taśm o grubości 0,12 mm w stanie utwardzonym po walcowaniu na zimno polegała na załadunku ich do pieca laboratoryjnego ustawionego na zadaną temperaturę, wytrzymaniu w tej temperaturze przez 2 min. i następnym chłodzeniu w powietrzu. Próby przeprowadzono w zakresie temperatur 750÷1100°C, zmieniając temperaturę co 50°C.

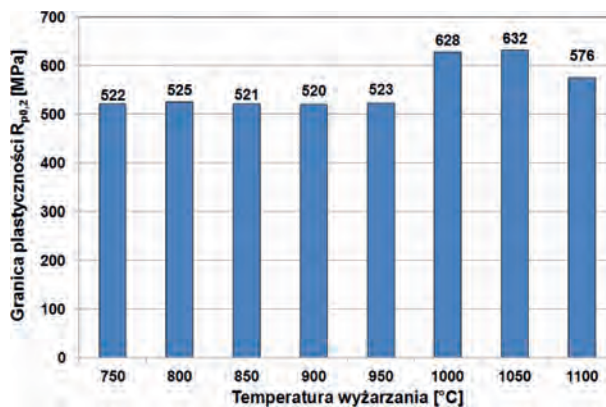
Na taśmach w stanie utwardzonym oraz po obróbce cieplnej wykonano następnie badania właściwości mechanicznych i struktury. Właściwości mechaniczne taśm ze stali X6Cr17 wyznaczono w statycznej próbie rozciągania. Próby te wykonano na próbkach płaskich o początkowej bazie pomiarowej 80 mm. Badania struktury taśm wykonano na powierzchniach walcowanych za pomocą mikroskopu skaningowego INSPECT

F z wykorzystaniem detektora SE i metody EBSD. Metodę EBSD opisano w literaturze [3÷5]. Badania z wykorzystaniem metody EBSD wykonano na próbkach nietrawionych przy napięciu przyspieszającym wiązki elektronów 22 kV. Obszar analizy obejmował każdorazowo powierzchnię 69×180 μm. Analizę prowadzono z krokiem skanowania 0,5 μm. Ilościową analizę obrazu wykonano przy użyciu oprogramowania Lucia G wersja 482. Dla każdej próbki badania wykonano w obszarze 300×300 μm.

Wyniki badań pozwoliły na wyznaczenie wpływu temperatury wyżarzania na właściwości mechaniczne i strukturę taśm ze stali X6Cr17.

## 3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań właściwości mechanicznych przedstawiono w tabelcy 1 oraz na rysunkach 1÷3. Granica plastyczności  $R_{p0,2}$  taśm po wyżarzaniu w zakresie temperatur 750÷1100°C zmienia się w zakresie od 520 MPa do 632 MPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie od 637 MPa do 1055 MPa. Taśmy wyżarzane w zakresie temperatur 750÷900°C mają zbliżoną granicę plastyczności  $R_{p0,2}$ , która wynosi 521÷525 MPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  maleje ze wzrostem temperatury wyżarzania w tym zakresie od 666 MPa do 637 MPa (rys. 1, 2). Po wyżarzaniu w temperaturze 950°C granica plastyczności wynosi 523 MPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie 905 MPa. Dalszy wzrost temperatury wyżarzania aż do 1050°C powoduje



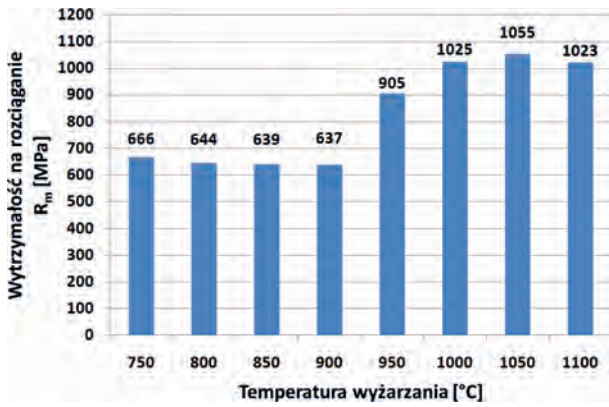
Rys. 1. Wpływ temperatury wyżarzania na granicę plastyczności  $R_{p0,2}$  taśm ze stali X6Cr17

Fig. 1. Effect of annealing temperature on yield point  $R_{p0,2}$  of X6Cr17 steel strips

Tablica 1. Wyniki prób rozciągania próbek po obróbce cieplnej

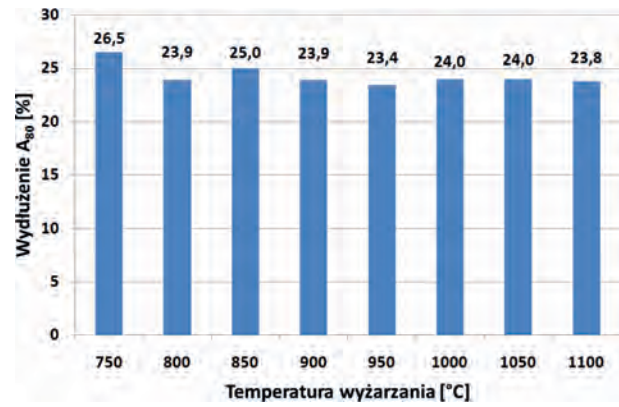
Table 1. Results of tensile tests on samples after heat treatment

Oznaczenie próbki/ temperatura wyżarzania [°C]	Początkowa długość pomiarowa $L_0$ [mm]	Granica plastyczności $R_{p0,2}$ [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [MPa]	Wydłużenie	
				$L_u$ [mm]	$A_{80}$ [%]
750	80	522	666	101,2	26,5
800		525	644	99,1	23,9
850		521	639	100,0	25,0
900		520	637	99,1	23,9
950		523	905	88,7	23,4
1000		628	1025	89,2	24,0
1050		632	1055	89,2	24,0
1100		576	1023	89,0	23,8



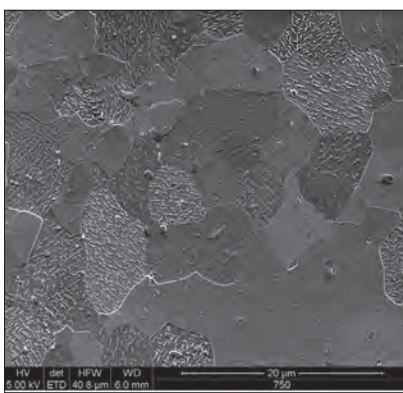
Rys. 2. Wpływ temperatury wyżarzania na wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  taśm ze stali X6Cr17

Fig. 2. Effect of annealing temperature on tensile strength  $R_m$  of X6Cr17 steel strips

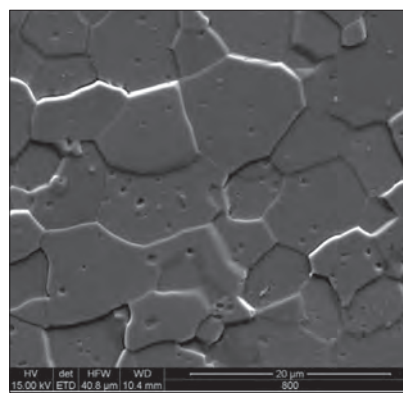


Rys. 3. Wpływ temperatury wyżarzania na wydłużenie  $A_{80}$  taśm ze stali X6Cr17

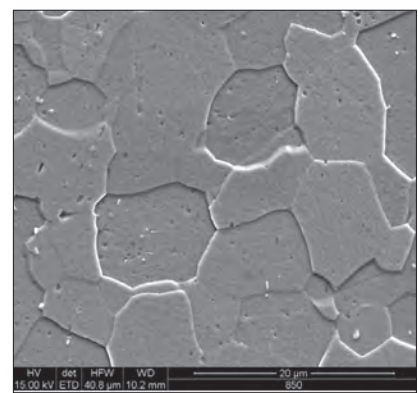
Fig. 3. Effect of annealing temperature on elongation  $A_{80}$  of X6Cr17 steel strips



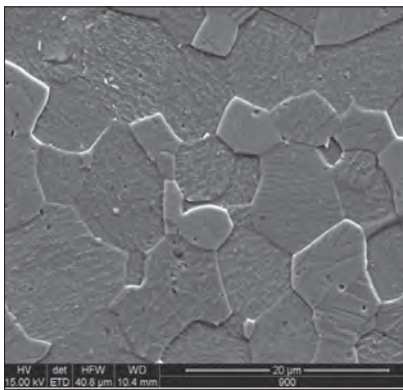
a)



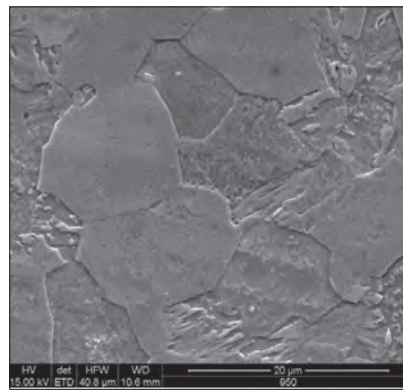
b)



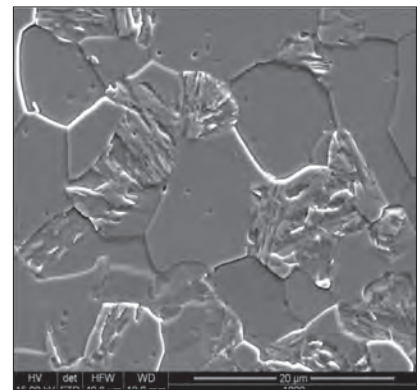
c)



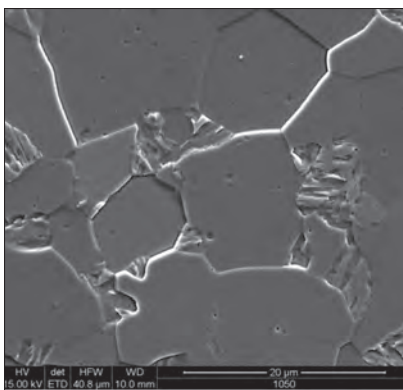
d)



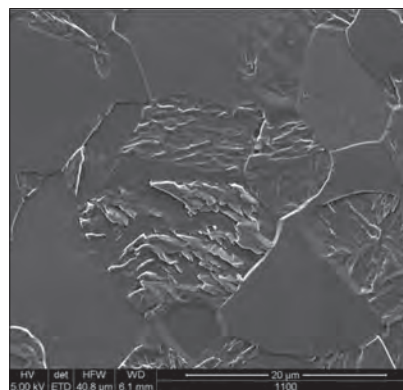
e)



f)



g)



h)

Rys. 4. Mikrostruktura taśm ze stali X6Cr17 po wyżarzaniu w temperaturze: a) 750°C, b) 800°C, c) 850°C, d) 900°C, e) 950°C, f) 1000°C, g) 1050°C, h) 1100°C

Fig. 4. Microstructure of X6Cr17 steel strips after annealing at: a) 750°C, b) 800°C, c) 850°C, d) 900°C, e) 950°C, f) 1000°C, g) 1050°C, h) 1100°C

je przyrost zarówno granicy plastyczności jak i wytrzymałości na rozciąganie, które po wyżarzaniu w temperaturze 1050°C wynoszą odpowiednio:  $R_{p0,2} = 632$  MPa,  $R_m = 1055$  MPa. Taśmy po wyżarzaniu w temperaturze 1100°C charakteryzują się nieco niższymi właściwościami mechanicznymi:  $R_{p0,2} = 576$  MPa,  $R_m = 1023$  MPa. Wydłużenie  $A_{80}$  taśm po wyżarzaniu w zakresie temperatury 750÷1100°C zmienia się w niewielkim stopniu w zakresie od 26,5% po wyżarzaniu w temperaturze 750°C do 23,4% po wyżarzaniu w temperaturze 950°C. Nie stwierdzono jednoznacznego wpływu temperatury wyżarzania taśm ze stali X6Cr17 na ich wydłużenie  $A_{80}$  (rys. 3).

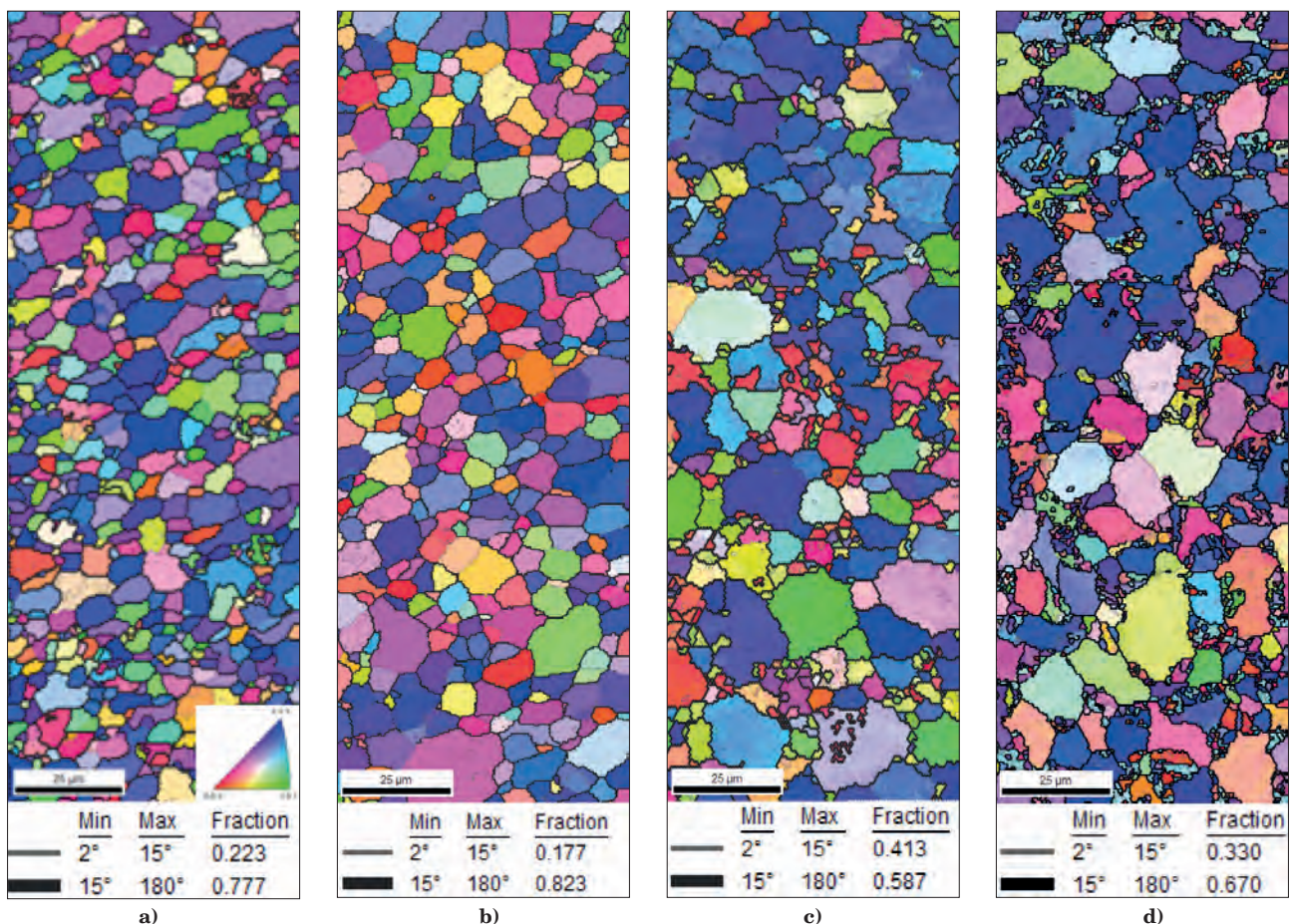
Wyniki badań mikrostruktury taśm ze stali X6Cr17 po obróbce cieplnej w zakresie temperatur 750÷1100°C przedstawiono na rysunku 4 (SE) oraz na rysunkach 5 i 6 (EBSD). Wyniki ilościowej analizy obrazu zestawiono w tabelicy 2 oraz na rysunku 7.

Mikrostruktura taśm po wyżarzaniu w zakresie temperatur 750÷900°C i następnym chłodzeniu na powietrzu złożona jest z ziarn ferrytu (rys. 4a÷d). Po schłodzeniu na powietrzu taśm wyżarzanych w zakresie temperatur wyższych tj. 950÷1100°C uzyskano strukturę ferrytyczno-martenzytyczną (rys. 4e÷h).

W strukturze taśm niezależnie od temperatury wyżarzania dominują ziarna zorientowane w kierunku

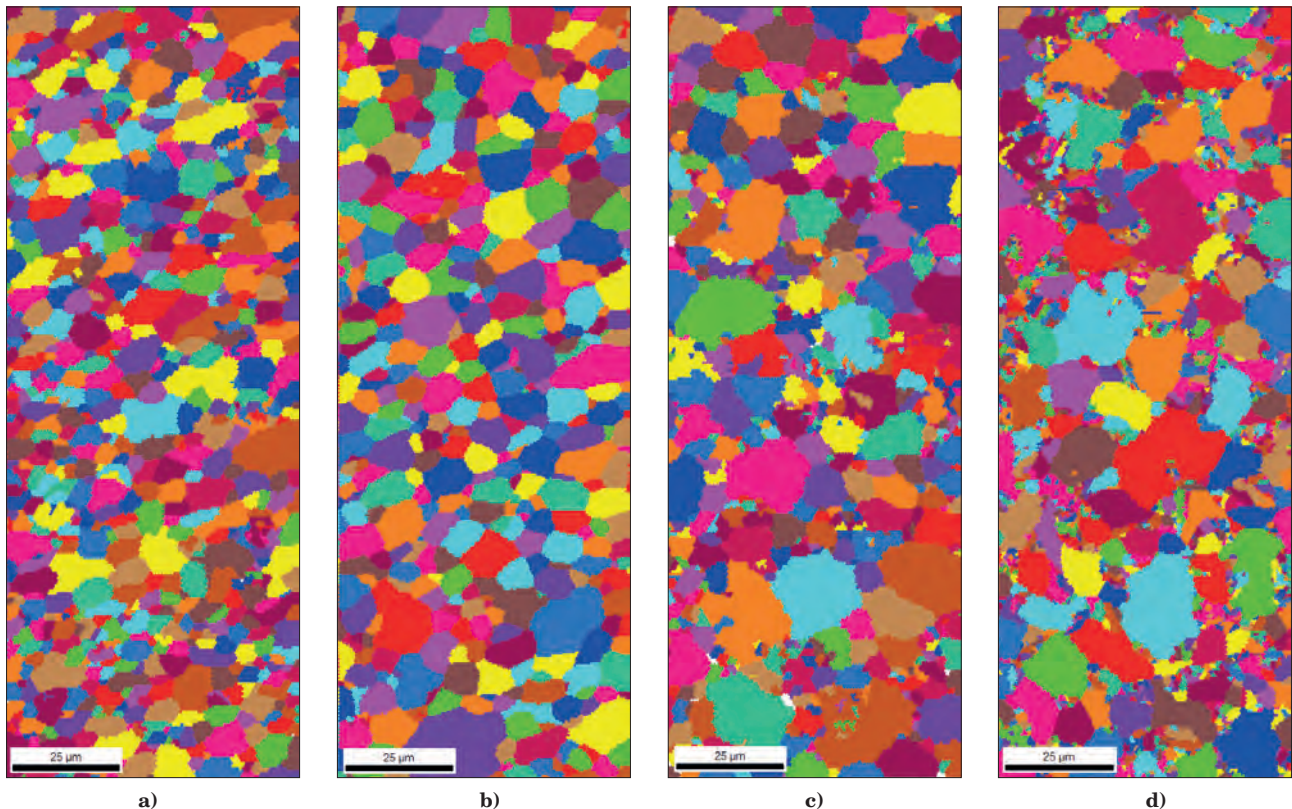
[111] (rys. 5). Taśmy ze stali X6Cr17 po wyżarzaniu w zakresie temperatur 750÷850°C mają dobrze wykształtowane ziarna ferrytu z przeważającym udziałem granic szerokokątowych (rys. 5a,b, 6a,b). Udział granic wąskokątowych w zakresie 2÷15° wynosi od 17 do 23%. (rys. 5a,b). Taśmy schłodzone na powietrzu po uprzednim wyżarzaniu w zakresie temperatur 950÷1100°C mają strukturę ferrytyczno-martenzytyczną (rys. 5c,d, 6c,d). W strukturze dominują granice szerokokątowe (rys. 5c,d).

Wyniki ilościowej analizy obrazu przedstawiono w tabelicy 2 i na rysunku 7. Średnia średnica równoważna ziarna ferrytu rośnie od 4,17  $\mu\text{m}$  do 8,76  $\mu\text{m}$  ze wzrostem temperatury wyżarzania w zakresie 750÷950°C. Taśmy ze stali X6Cr17 po wyżarzaniu w temperaturze 950°C posiadają około 16% martenzytu (tablica 2). Wzrost temperatury wyżarzania do 1000°C powoduje zwiększenie udziału martenzytu w strukturze do 43%. Towarzyszy temu spadek średniej średnicy równoważnej ziarna ferrytu do 6,89  $\mu\text{m}$ . Po wyżarzaniu w temperaturze 1050°C zawartość martenzytu wynosi około 44%. Dalszy wzrost temperatury wyżarzania do 1100°C nie wywołuje istotnej zmiany zawartości martenzytu w strukturze. Średnia średnica równoważna ziarna ferrytu po wyżarzaniu w tej temperaturze wynosi 9,66  $\mu\text{m}$ .



Rys. 5. Wyniki analizy taśm ze stali X6Cr17 metodą EBSD, przedstawiające rozkład orientacji ziarn z naniesionymi granicami szerokokątowymi (grube linie) i wąskokątowymi (cienkie linie) po wyżarzaniu w temperaturze: a) 750°C, b) 850°C, c) 950°C, d) 1050°C

Fig. 5. Results of analysis of X6Cr17 steel strips by EBSD method, presenting the grain orientation distribution with high-angle (heavy lines) and low-angle (light lines) boundaries plotted on, after annealing at: a) 750°C, b) 850°C, c) 950°C, d) 1050°C



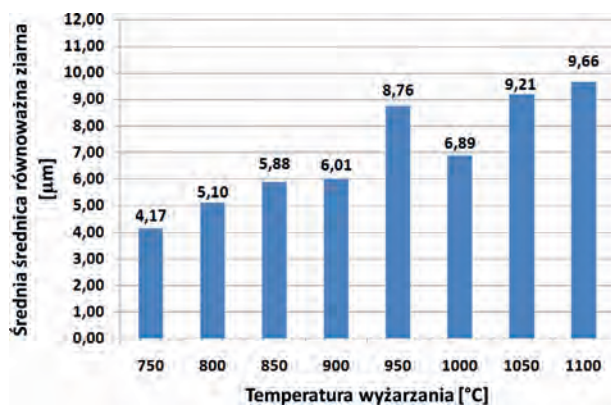
Rys. 6. Wyniki analizy taśm ze stali X6Cr17 metodą EBSD, przedstawiające rozkład ziarn o kącie dezorientacji  $\geq 15^\circ$  w stanie po wyżarzaniu w temperaturze: a) 750°C, b) 850°C, c) 950°C, d) 1050°C

Fig. 6. Results of analysis of X6Cr17 steel strips by EBSD method, presenting the distribution of grains with disorientation angle  $\geq 15^\circ$ , in state after annealing at: a) 750°C, b) 850°C, c) 950°C, d) 1050°C

Tablica. 2. Wyniki ilościowej analizy obrazu

Table 2. Results of quantitative image analysis

Oznaczenie próbki/ temperatura wyżarzania [°C]	Średnia średnica równoważna ziarna ferrytu [ $\mu\text{m}$ ]	Odchylenie standardowe	Udział powierzchniowy [%]	
			ferryt	martenzyt
750	4,17	1,90	100	-
800	5,10	2,04	100	-
850	5,88	2,01	100	-
900	6,01	2,20	100	-
950	8,76	3,55	84	16
1000	6,89	2,90	57	43
1050	9,21	3,19	56	44
1100	9,66	3,60	58	42



Rys. 7. Wpływ temperatury wyżarzania taśm ze stali X6Cr17 na średnią średnicę równoważną ziarna ferrytu

Fig. 7. Effect of annealing temperature of X6Cr17 steel strips on average equivalent diameter of ferrite grain

#### 4. WNIOSKI

W ramach pracy przeprowadzono badania wpływu temperatury wyżarzania taśm o grubości 0,12 mm wykonanych ze stali X6Cr17 na ich właściwości mechaniczne i strukturę. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- Wzrost temperatury wyżarzania taśm ze stali X6Cr17 w zakresie 750÷900°C nie wpływa istotnie na granicę plastyczności  $R_{p0,2}$ , która wynosi 521÷525 MPa. Wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  maleje natomiast ze wzrostem temperatury wyżarzania w tym zakresie od 666 MPa do 637 MPa. Po wyżarzaniu w temperaturze 950°C granica plastyczności wynosi 523 MPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie 905 MPa. Dalszy wzrost temperatury wyżarzania w zakresie temperatur 950÷1100°C powoduje przyrost granicy

plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie. Granica plastyczności w zależności od temperatury wyżarzania wynosi od 576 MPa do 632 MPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie taśm od 1023 MPa do 1055 MPa;

- b. Taśmy wyżarzane w zakresie temperatur 750÷900°C posiadają strukturę ferrytyczną. Przyrost właściwości wytrzymałościowych po wyżarzaniu w zakresie temperatur 950÷1100°C związany jest z występowaniem w strukturze taśm oprócz ferrytu również mar-

tenzytu, którego udział zależy jest od temperatury wyżarzania i wynosi od 16% do 44%.

- c. Wzrost temperatury wyżarzania taśm w zakresie temperatur 750÷1100°C powoduje rozrost ziarna ferrytu. Średnia średnica równoważna ziarna ferrytu w badanym zakresie temperatury wyżarzania rośnie z 4,17 µm do 9,66 µm.

***Praca zrealizowana w ramach projektu celowego nr ROW-III-101-2010.***

#### LITERATURA

1. Adamiec A., Radwański K., Wiedermann J., Stępień J.: Wpływ metody wytwarzania naroży kształtowych na taśmach walcowanych na zimno ze stali konstrukcyjnej na ich jakość, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, nr 1, 2010, s. 161-167
2. Radwański K., Wiedermann J., Adamiec A., Stępień J.: Struktura i właściwości taśm ze stali N7E przeznaczonych na wyroby z narożami kształtowymi, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, tom 60; nr 4, 2008, s. 39-44
3. Dingley D.J., Randle V.: Microtexture determination by electron backscatter diffraction, Journal of Material Science, 27, s. 4545÷4566.
4. Schwartz A., Kumar M., L. Adams B.: Electron Backscatter Diffraction in Materials Science, Kluwer, 2000.
5. Humphreys J.F.: Quantitative metallography by electron backscattered diffraction, Journal of Microscopy, 197 3, 1999, s. 170÷185.