

Jerzy WIEDERMANN, Krzysztof RADWAŃSKI

Instytut Metalurgii Żelaza

Andrzej ADAMIEC

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

Jarosław GAZDOWICZ

Instytut Metalurgii Żelaza

## WPLYW ODKSZTAŁCENIA NA ZIMNO I OBRÓBK CIEPLNEJ NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I STRUKTURĘ TAŚM PRZEZNACZONYCH NA PIŁY TAŚMOWE

*Celem pracy było określenie wpływu parametrów odkształcenia oraz międzyoperacyjnej i końcowej obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne, strukturę i właściwości użytkowe taśm ze stali C75 pod kątem zastosowania ich na piły taśmowe. Taśmę wyjściową walcowaną na gorąco o grubości 2,00 mm poddano walcowaniu na zimno na grubość 0,65 mm w kolejnych 8 przepustach przedzielonych międzyoperacyjną obróbką cieplną. Następnie wykonano próby hartowania i odpuszczania taśm w celu nadania im końcowych właściwości użytkowych, spełniających wymagania na piły taśmowe w zakresie twardości, płaskości i jakości powierzchni. Przeprowadzone badania wykazały, że w oparciu o zastosowane parametry procesów opracowano technologię wytwarzania taśm spełniających wymagania stawiane piłom taśmowym. Uzyskano zadaną kategorię twardości taśm w drodze hartowania i odpuszczania. Końcowa mikrostruktura w zależności od temperatury odpuszczania złożona jest z odpuszczonego martenzytu lub sorbitu. Taśmy spełniają również wymagania związane ze stanem powierzchni oraz płaskością bez efektu korytkowości.*

*Słowa kluczowe:* taśma zimnowalcowana, stal C75, obróbka cieplna, właściwości mechaniczne, mikrostruktura

## THE EFFECT OF COLD DEFORMATION AND HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF STEEL STRIPS FOR BAND SAWS

*The purpose of the work was to determine the effect of deformation as well as in-process and final heat treatment parameters on mechanical properties, structure and functional properties of C75 steel strips with regard to their use for band saws. The 2.00 mm thick initial hot rolled strip was subject to cold rolling to a thickness of 0.65 mm in 8 consecutive passes separated by in-process heat treatment. Then the strip quench hardening and tempering tests were performed to give them their final functional properties meeting the requirements for band saws with regard to hardness, flatness and surface quality. The tests revealed that based on the process parameters used, the technology for manufacturing steel strips meeting the requirements for band saws had been developed. The preset strip hardness category was obtained by quench hardening and tempering. Depending on the tempering temperature, the final microstructure consists of tempered martensite or sorbite. The strips also meet the requirements related to surface condition and flatness with no crossbow effect.*

*Keywords:* cold-rolled strip, steel C75, heat treatment, mechanical properties, microstructure

### 1. WSTĘP

Piły taśmowe do drewna wykonywane są głównie ze stali narzędziowych poprzez nacinanie zębów i zgrzewanie końców bezpośrednio na materiale dostarczonym przez wytwórcę taśm. Producent pił taśmowych nie wykonuje operacji istotnych dla właściwości użytkowych pił, dlatego od wytwórcy taśm wymaga się nadania produktowi odpowiednich cech geometrycznych i struktury, zapewniających uzyskanie właściwości użytkowych gotowych pił. Taśmy stalowe dostarczane są zarówno

w stanie utwardzonym po walcowaniu jak i ulepszonym cieplnie. Taśmy powinny charakteryzować się wysokim stopniem płaskości, bez korytkowości oraz jasną i błyszczącą powierzchnią. Jeden z brzegów taśmy powinien posiadać kształt zaokrąglony. Tematyka kształtowania brzegów taśm była przedmiotem wcześniejszej publikacji [1]. Piły taśmowe ze względu na warunki eksploatacji powinny być sprężyste, a jednocześnie posiadać odpowiednią zadaną twardość.

Krajowi producenci pił taśmowych sprowadzają taśmy z zagranicy, najczęściej z Niemiec lub ze Szwecji.

Tablica 1. Skład chemiczny dostarczonych do badań taśm

Table 1. Chemical composition of strips delivered for testing

Gatunek stali	Pierwiastek %wag.								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ni	Cu
C75	0,74	0,26	0,72	0,012	0,005	0,17	0,014	0,15	0,210

W Polsce produkowane są obecnie taśmy walcowane na zimno ze stali konstrukcyjnych, sprężynowych i narzędziowych zarówno o prostych jak i kształtowych narożach [1, 2]. W ostatnim okresie opracowano i wdrożono technologię wytwarzania super cienkich taśm ze stali odpornych na korozję [3÷5]. W związku z istniejącym zapotrzebowaniem na taśmy spełniające wymagania na piły taśmowe Przeróbka Plastyczna na Zimno – Baildon Sp. z o.o. wspólnie z Instytutem Metalurgii Żelaza podjęła próbę uruchomienia produkcji takich taśm.

Uruchomienie produkcji taśm na piły taśmowe wymaga opracowania parametrów ich przeróbki plastycznej, obróbki cieplnej, a w konsekwencji całej technologii wytwarzania.

W ramach pracy zbadano wpływ odkształcenia na zimno, międzyoperacyjnej i końcowej obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne, strukturę i właściwości użytkowe taśm przeznaczonych na piły taśmowe.

## 2. MATERIAŁ, ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Materiał do badań stanowiły taśmy ze stali C75 o składzie chemicznym przedstawionym w tablicy 1. W stanie wyjściowym tj. po walcowaniu na gorąco taśmy posiadały wymiar 50,0 × 2,0 mm oraz następujące minimalne właściwości mechaniczne:  $R_{p0,2} \geq 580$  MPa,  $R_m \geq 980$  MPa,  $A_{80} \geq 13\%$ , twardość Vickersa  $\geq 300$  HV.

Taśmy walcowano na zimno do grubości 0,65 mm w kolejnych 8 przepustach z zastosowaniem 2 międzyoperacyjnych obróbek cieplnych w następującym rozkładzie: I przepust 2,00 → 1,90, międzyoperacyjna obróbka cieplna, II przepust 1,90 → 1,85 mm, III przepust 1,85 → 1,75 mm, IV przepust 1,75 → 1,40 mm, V przepust 1,40 → 1,20 mm, międzyoperacyjna obróbka cieplna, VI przepust 1,20 → 1,05 mm, VII przepust 1,05 → 0,90 mm, VIII przepust 0,90 → 0,65 mm.

Międzyoperacyjne obróbki cieplne wykonano w temperaturze 740°C i czasie 7 h na taśmach zwiniętych w kręgi. Chłodzenie prowadzono z piecem do 600°C, następnie pod kołpakiem pośrodkim do ok. 500°C, dalsze studzenie pod muflą ochronną na powietrzu.

Po walcowaniu wyznaczono:

– gniot względny w  $i$ -tym przepuście:

$$\varepsilon_{hi} = \frac{h_{i-1} - h_i}{h_{i-1}} \quad (1)$$

gdzie:

$h_{i-1}$  – grubość taśmy po przepuście  $i-1$ , mm,

$h_i$  – grubość taśmy po  $i$ -tym przepuście, mm.

– oraz całkowity gniot względny po  $i$ -tym przepuście:

$$\varepsilon_{hCi} = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \quad (2)$$

gdzie:

$h_0$  – grubość początkowa, mm,

$h_i$  – grubość po  $i$ -tym przepuście, mm.

Wyniki obliczeń na podstawie zależności (1 i 2) przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Grubość i wartości gniotu pojedynczego i całkowitego po kolejnych przepustach w procesie walcowania na zimno taśm ze stali C75

Table 2. Thickness and values of single and total draft after consecutive roll passes in cold rolling of C75 steel strips

Nr przepustu	Grubość taśmy po $i$ -tym przepuście $h_i$ [mm]	Gniot względny w $i$ -tym przepuście $\varepsilon_{hi}$	Całkowity gniot względny po $i$ -tym przepuście $\varepsilon_{hCi}$
0	2,00	0,00	0,00
1	1,90	0,05	0,05
1 – po o.c.	1,90	0,00	0,05
2	1,85	0,03	0,08
3	1,75	0,05	0,13
4	1,40	0,20	0,30
5	1,20	0,14	0,40
6 – po o.c.	1,05	0,13	0,48
6	1,05	0,00	0,48
7	0,90	0,14	0,55
8	0,65	0,28	0,68

Końcowa obróbka cieplna obejmująca hartowanie i odpuszczanie taśm została przeprowadzona w linii ASEA z prędkością przesuwu taśmy 4,4 m/min. w warunkach Przeróbki Plastycznej na Zimno Baildon Sp. z o.o. Hartowanie wykonano z temperatury 840°C z chłodzeniem w oleju. Odpuszczanie przeprowadzono w temperaturach 375, 425, 550°C. Pozwoliło to na opracowanie technologii wytwarzania taśm w 3 kategoriach twardości. Kategorie te przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3. Parametry obróbki cieplnej taśm zapewniające uzyskanie zadanej kategorii twardości dla taśm ze stali C75 i grubości 0,65 mm

Table 3. Heat treatment parameters of strips to allow obtaining the preset hardness category for C75 steel strips with thickness of 0.65 mm

Kategoria twardości	Twardość		Temperatura kąpieli ołowianej w linii ASEA [°C]
	wg Vickersa	wg Rockwella	
	HV	HRC	
T1	287÷375	30÷38	500÷600
T2	376÷515	39÷49	400÷450
T3	516÷765	50÷60	370÷380

Na taśmach w stanie utwardzonym oraz po obróbce cieplnej wykonano badania właściwości mechanicznych i struktury. Właściwości mechaniczne taśm wyznaczono w statycznej próbie rozciągania. Próby przeprowadzono na próbkach płaskich o początkowej bazie pomiarowej 80 mm. Pomiary twardości wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 9,81 N. Badania struktury taśm wykonano na zglądach wzdłużnych do kierunku walcowania za pomocą mikroskopu świetlnego. Do badań płaskości zastosowano płytę kamienną o cechowanej gładkości i płaskości, używanej do ustawiania układu optycznego mikroskopu elektronowego. Badania przeprowadzo-

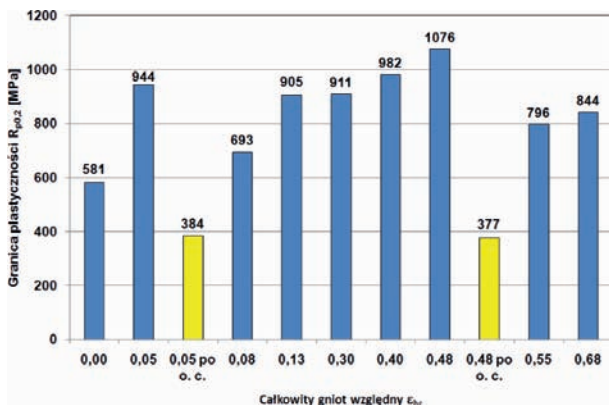
no na odcinkach taśm o jednakowej długości. Analizę przeprowadzono na długości i szerokości taśmy.

Wyniki badań pozwoliły na wyznaczenie wpływu odkształcenia i obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne i strukturę taśm ze stali C75. Określono również właściwości użytkowe taśm gotowych przeznaczonych na piły taśmowe.

### 3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań właściwości mechanicznych i pomiarów twardości taśm ze stali C75 pobranych po poszczególnych przepustach w procesie walcowania przedzielonego dwukrotną międzyoperacyjną obróbką cieplną w temperaturze 740°C przedstawiono w tablicy 3 oraz na rysunkach 1÷4.

Zwiększenie całkowitego gniotu względnego do  $\varepsilon_{hc} = 0,05$  powoduje zwiększenie granicy plastyczności taśm z  $R_{p0,2}$  z 581 MPa do 944 MPa przy równoczesnym zwiększeniu wytrzymałości na rozciąganie z 982 MPa do 1060 MPa (rys. 1 i 2). Taśmy odkształcone z gniotem  $\varepsilon_{hc} = 0,05$  poddano następnie międzyoperacyjnej obróbce cieplnej, która spowodowała zmniejszenie ich granicy plastyczności do wartości  $R_{p0,2} = 384$  MPa i wytrzymałości na rozciąganie  $R_m = 746$  MPa oraz wzrost wydłużenia  $A_{80}$  z 8,4% do 13,4% (rys. 1÷3). Twardość taśm po wyżarzaniu międzyoperacyjnym zmniejszyła się z 325



Rys. 1. Wpływ całkowitego gniotu względnego  $\varepsilon_{hc}$  i obróbki cieplnej na granicę plastyczności  $R_{p0,2}$

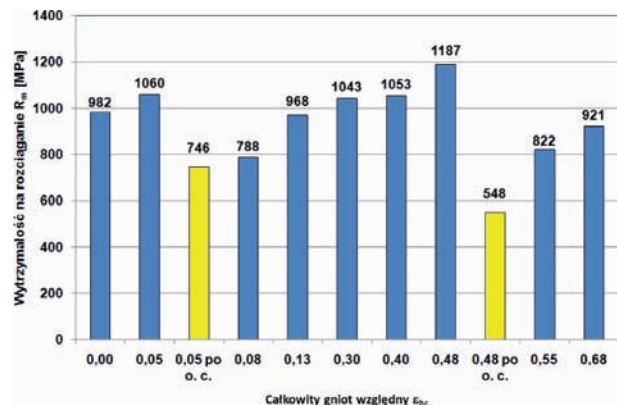
Fig. 1. Effect of total relative draft  $\varepsilon_{hc}$  and heat treatment on yield point  $R_{p0,2}$

HV1 do 231 HV1 (rys. 4). Zwiększenie całkowitego gniotu z  $\varepsilon_{hc} = 0,05$  do  $\varepsilon_{hc} = 0,48$  w kolejnych 5 przepustach, powoduje wzrost granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i twardości oraz zmniejszenie wydłużenia do wartości odpowiednio:  $R_{p0,2} = 1076$  MPa,  $R_m = 1187$  MPa, 326 HV1,  $A_{80} = 4,6\%$ . Przeprowadzona obróbka cieplna po tym odkształceniu spowodowała uplastycznienie taśm. Właściwości mechaniczne taśm po obróbce cieplnej wynoszą:  $R_{p0,2} = 377$  MPa,  $R_m = 548$  MPa,  $A_{80} = 24,9\%$  i 159 HV1. Następne zwiększenie całkowitego gniotu względnego do wartości  $\varepsilon_{hc} = 0,68$  uzyskane w 2 przepustach doprowadziło do dwukrotnego wzrostu granicy plastyczności. Końcowe właściwości mechaniczne taśm po walcowaniu na zimno wynoszą:  $R_{p0,2} = 844$  MPa,  $R_m = 921$  MPa,  $A_{80} = 3,4\%$  i 261 HV1.

Taśmy w tym stanie poddano następnie obróbce cieplnej polegającej na hartowaniu i odpuszczaniu w celu nadaniu im końcowych właściwości mechanicznych. Średnia twardość taśm po hartowaniu z temperatury 840°C wynosi 845 HV1. Średnia twardość taśm po odpuszczaniu w temperaturach 375, 425 i 550°C wynosi odpowiednio: 340, 490 i 605 HV1.

Wyniki badań mikrostruktury taśm po odkształceniu oraz międzyoperacyjnej obróbce cieplnej przedstawiono na rysunku 5.

Taśma walcowana na gorąco ma strukturę perlityczną z niewielkim udziałem ferrytu (rys. 5a). Walcowanie na zimno powoduje wydłużanie się ziarn w kierunku



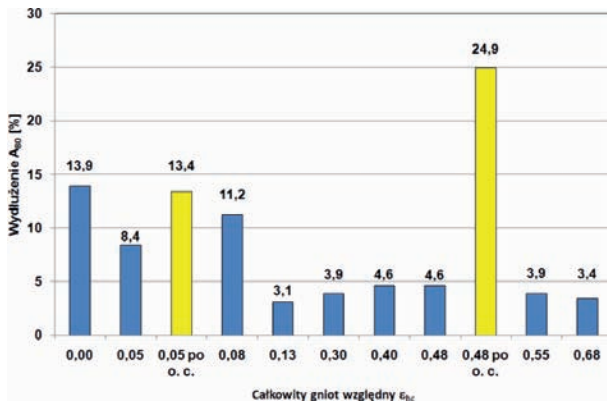
Rys. 2. Wpływ całkowitego gniotu względnego  $\varepsilon_{hc}$  i obróbki cieplnej na wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$

Fig. 2. Effect of total relative draft  $\varepsilon_{hc}$  and heat treatment on tensile strength  $R_m$

Tablica. 4. Wyniki prób rozciągania próbek ze stali C75 po kolejnych przepustach w procesie walcowania na zimno

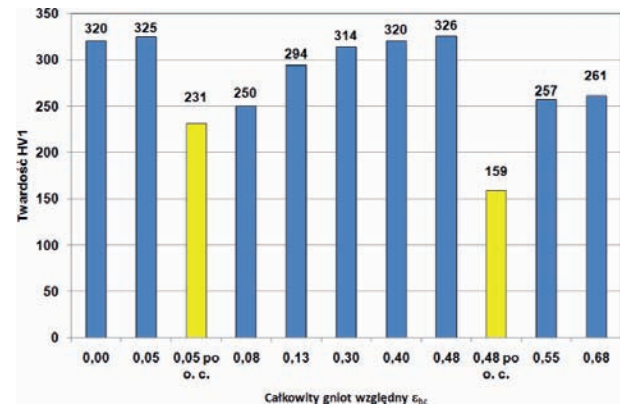
Table 4. Tensile test results of C75 steel test pieces after consecutive roll passes in cold rolling

Oznaczenie próbki $\varepsilon_{hc}$	Granica plastyczności $R_{p0,2}$ [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [MPa]	Wydłużenie $A_{80}$ [%]	Średnia twardość HV1
0,00	581	982	13,9	320
0,05	944	1060	8,4	325
0,05 po o. c.	384	746	13,4	231
0,08	693	788	11,2	250
0,13	905	968	3,1	294
0,30	911	1043	3,9	314
0,40	982	1053	4,6	320
0,48	1076	1187	4,6	326
0,48 po o. c.	377	548	24,9	159
0,55	796	822	3,9	257
0,68	844	921	3,4	261



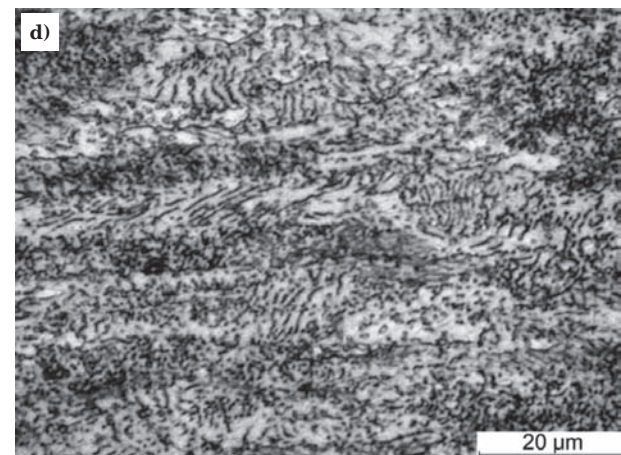
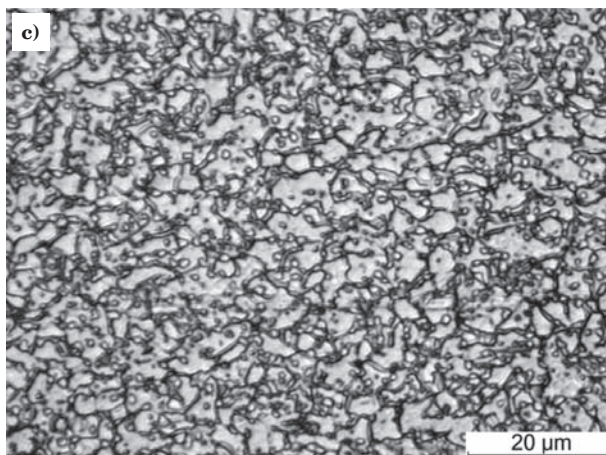
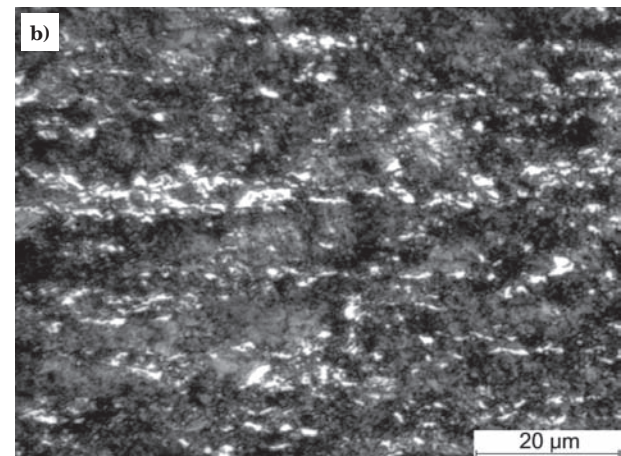
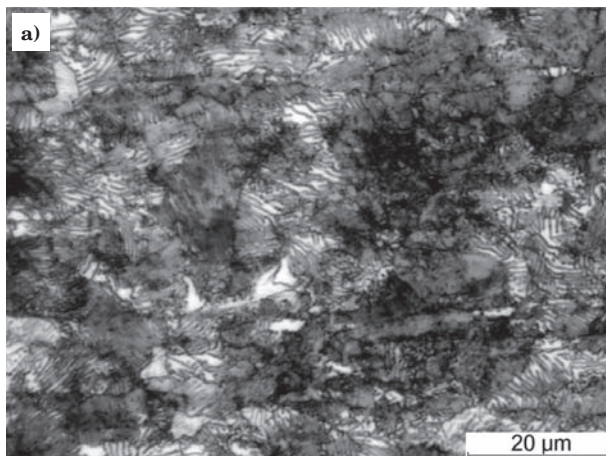
Rys. 3. Wpływ całkowitego gniotu względnego  $\epsilon_{hc}$  i obróbki cieplnej na wydłużenie

Fig. 3. Effect of total relative draft  $\epsilon_{hc}$  and heat treatment on elongation



Rys. 4. Wpływ całkowitego gniotu względnego  $\epsilon_{hc}$  i obróbki cieplnej na twardość HV1

Fig. 4. Effect of total relative draft  $\epsilon_{hc}$  and heat treatment on HV1 hardness



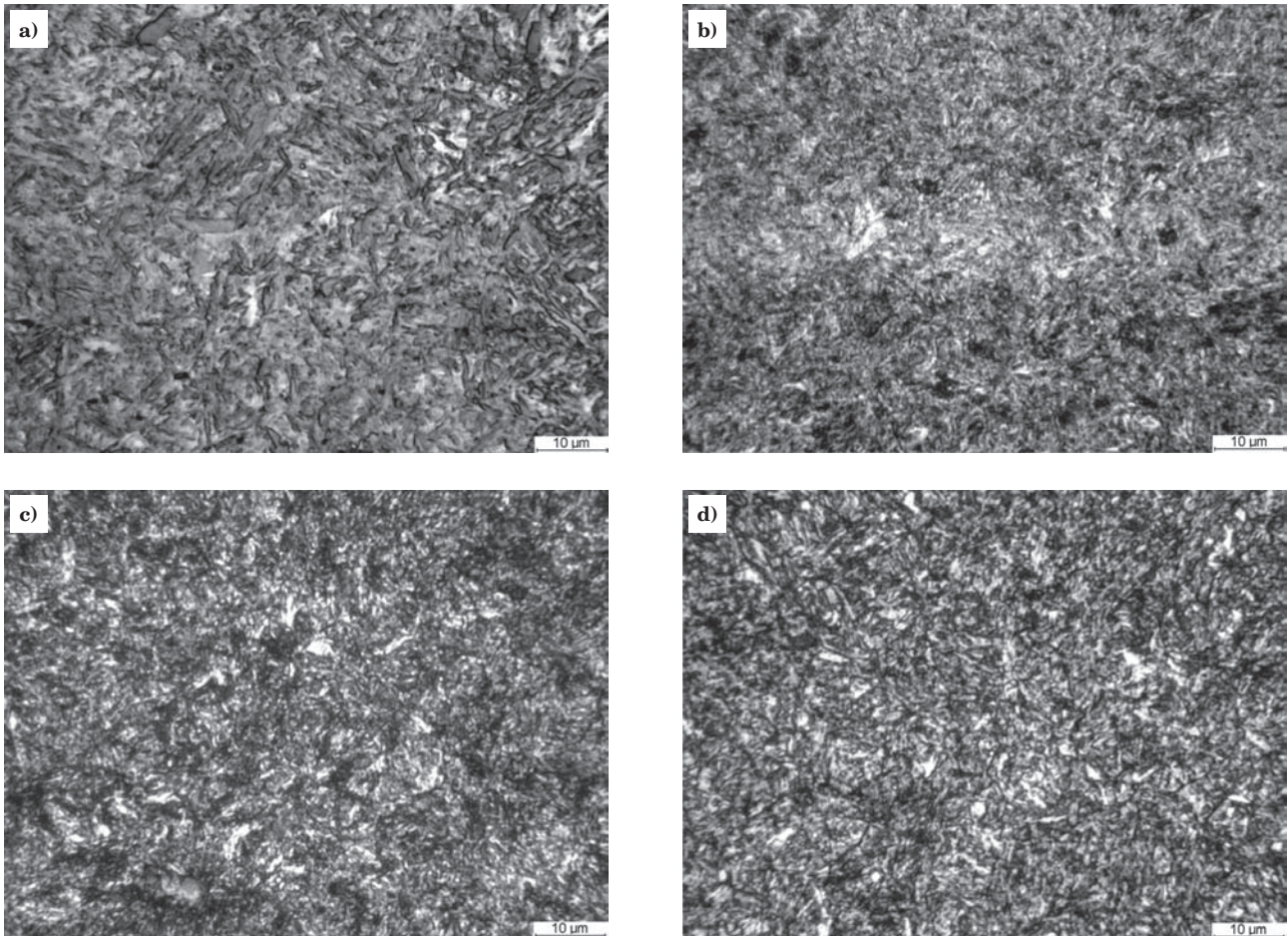
Rys. 5. Mikrostruktura taśm ze stali C75 po: a) walcowaniu na gorąco, b) walcowaniu na zimno z gniotem całkowitym  $\epsilon_{hc} = 0,05$ , c) walcowaniu na zimno z gniotem całkowitym  $\epsilon_{hc} = 0,48$  i międzyoperacyjnej obróbce cieplnej, d) walcowaniu na zimno z gniotem całkowitym  $\epsilon_{hc} = 0,68$

Fig. 5. Microstructure of C75 steel strips after: a) hot rolling, b) cold rolling with total draft of  $\epsilon_{hc} = 0.05$ , c) cold rolling with total draft of  $\epsilon_{hc} = 0.48$  and in-process heat treatment, d) cold rolling with total draft of  $\epsilon_{hc} = 0.68$

walcowania (rys. 5b). Po międzyoperacyjnej obróbce cieplnej struktura złożona jest z sferoidytu o osnowie ferrytycznej (rys. 5c). Struktura ta nie wykazuje skutków gniotu. Dalsze walcowanie na zimno powoduje ponowne wydłużanie się ziarn w kierunku walcowania (rys. 5d).

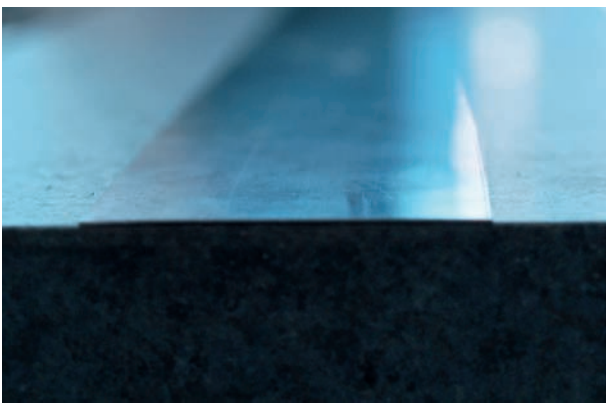
Wyniki badań mikrostruktury taśm po hartowaniu i odpuszczaniu przedstawiono na rysunku 6. Taśmy po

hartowaniu z temperatury 840°C mają strukturę martenzytyczną (rys. 6a). Po odpuszczaniu w temperaturze 375°C struktura taśm złożona jest z odpuszczonego martenzytu (rys. 6b). Taśmy odpuszczane w temperaturze 425°C i 550°C posiadają strukturę sorbityczną, która jest drobniejsza po odpuszczaniu w niższej temperaturze (rys. 6c i 6d).



Rys. 6. Mikrostruktura taśm ze stali C75 po hartowaniu z temperatury 840°C (a) oraz następnym odpuszczaniu w temperaturze: b) 375°C, c) 425°C, d) 550°C

Fig. 6. Microstructure of C75 steel strips after quenching from 840°C (a) and following tempering at: b) 375°C, c) 425°C, d) 550°C



Rys. 7. Taśma przeznaczona na piły taśmowe po ulepszeniu cieplnym

Fig. 7. Strip for band saws after toughening

Makrofotografię ulepszonej cieplnie taśmy gotowej na jej szerokości przylegającej do płyty kamiennej o cechowanej gładkości i płaskości przedstawiono na rysunku 7. Taśma przylega w sposób prawidłowy do płyty zarówno na długości jak i szerokości i nie wykazuje efektu korytkowatości. Powierzchnia taśmy jest jasna i błyszcząca.

## WNIOSKI

W ramach pracy przeprowadzono badania wpływu odkształcenia i obróbki cieplnej taśm ze stali C75 na ich właściwości mechaniczne, strukturę i właściwości użytkowe pod kątem zastosowania ich na piły taśmowe. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- opracowane parametry odkształcenia i obróbki cieplnej pozwalają na wytwarzanie taśm o grubości 0,65 mm,
- zastosowane parametry końcowej obróbki cieplnej tj. hartowania i odpuszczania taśm umożliwiają uzyskanie zadanej kategorii twardości,
- w drodze kolejnych operacji walcowania na zimno oraz międzyoperacyjnej i końcowej obróbki cieplnej uzyskano produkt finalny spełniający wymagania stawiane taśmom przeznaczonym na piły taśmowe. Poza twardością dotyczy to również płaskości oraz jasnej błyszczącej powierzchni taśm.

## 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. Radwański K., Wiedermann J., Adamiec A., Gazdowicz J.: Wpływ przeróbki plastycznej na zimno w procesie wytwarzania super cienkich taśm ze stali X6Cr17 na właściwości mechaniczne i strukturę, Hutnik – Wiadomości Hutnicze, nr 10; 2011, nr 4, s. 864-869
4. Radwański K., Wiedermann J., Adamiec A., Stępień J.: Wpływ parametrów obróbki cieplnej taśm ze stali X6Cr17 na ich właściwości mechaniczne i strukturę, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, t. 64; 2012, nr 2, s. 2-7
5. Radwański K., Wiedermann J., Adamiec A., Gazdowicz J.: Struktura i właściwości mechaniczne super cienkich taśm ze stali odpornych na korozję wytwarzanych w procesie walcowania na zimno, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, oddane do druku, 2012

***Praca zrealizowana w ramach projektu celowego nr 6 Zr7 2009C/07342.***