

Artur ŻAK, Valeriy PIDVYSOTS'KYY, Dariusz WOŹNIAK, Rafał PALUS

Instytut Metalurgii Żelaza im. St. Staszica

# OPRACOWANIE PODSTAW PRZEMYSŁOWEJ TECHNOLOGII WYTWARZANIA BLACH ZE STALI KONSTRUKCYJNEJ WIELOFAZOWEJ Z ZASTOSOWANIEM METODY PÓLPRZEMYSŁOWEJ SYMULACJI

W artykule przedstawiono wyniki fizycznej symulacji półprzemysłowej walcowania blach ze stali konstrukcyjnej wielofazowej. Na podstawie uzyskanych wyników badań właściwości mechanicznych i mikrostruktury odwalcowanych blach opracowano wytyczne do przemysłowej technologii walcowania blach ze stali zawierającej 0,1% C, 1,5–2,0% Mn i zmiennej zawartości Ti i V pozwalające na uzyskanie blach o grubości 4 mm i 10 mm o wytrzymałości na rozciąganie wyższej od 900 MPa i wydłużeniu  $A_5$  powyżej 16%, co odpowiada maksymalnej wytrzymałości dostępnych komercyjnie taśm ze stali typu CP. Wysokie właściwości wytrzymałościowe blach są wynikiem wytworzenia drobnoziarnistej struktury bainityczno-ferrytycznej. Najlepszy zespół właściwości mechanicznych gotowego wyrobu uzyskano po walcowaniu z temperaturą końca walcowania około 920°C oraz po przyspieszonym chłodzeniu do temperatury 500°C i wytrzymaniu w tej temperaturze w czasie 1800 s.

*Słowa kluczowe:* stal wielofazowa, symulacja półprzemysłowa, walcowanie na gorąco, mikrostruktura, właściwości mechaniczne blach

## DEVELOPMENT OF BASIC PARAMETERS OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING OF MULTI-PHASE STRUCTURAL STEEL PLATES USING SEMI-INDUSTRIAL METHOD OF SIMULATION

In this paper, the results of semi-industrial physical simulation of rolling multi-phase (CP) steel plates are presented. Based on the results of mechanical property and microstructure investigations, the guidelines on industrial technology for hot rolling of plates from steel containing (in %wt.) 0.1% C, 1.5–2.0 % Mn and variable contents of Ti and V was elaborated. This process allows manufacturing plates with thickness from 4 mm to 10 mm, tensile strength above 900 MPa and elongation  $A_5$  above 16 %, which corresponds to the maximum tensile strength of the currently commercially available strips from CP steels. High level of tensile strength is the result of fine-grained bainite-ferrite microstructure. The best combination of mechanical properties for the final product was achieved after hot rolling with end-of-rolling temperature of 920°C as well as after accelerated cooling to 500°C and holding at this temperature for 1800 s.

*Key words:* multi-phase steel, semi-industrial simulation, hot rolling, microstructure, mechanical properties of plates

### 1. WPROWADZENIE

Stale wielofazowe (ang. Complex Phase – CP) są nowoczesnymi gatunkami stali wysokiej wytrzymałości i dużej plastyczności uzyskiwanej w wyniku wytworzenia złożonej drobnoziarnistej mikrostruktury zawierającej ferryt, bainit i martenzyt. Stale CP z osnową bainityczną, zawierające ferryt i martenzyt stosowane są głównie w postaci blach walcowanych na gorąco i zimno w przemyśle samochodowym. Stale te obok wysokiej wytrzymałości charakteryzują się bardzo dobrą tłocznością [1–3]. Wysoka wytrzymałość wyrobów ze stali wielofazowych jest wynikiem wytworzenia struktury złożonej z ferrytu bainitycznego o dużej gęstości dyslokacji, wydzieleni faz twardych – bainitu i marten-

zytu oraz umocnienia wydzieleniowego dyspersyjnymi cząstkami węglików i/lub azotków wanadu, niobu i tytanu. Z uwagi na konieczność kontroli udziału objętościowego ferrytu w strukturze tych stali, maksymalna zawartość węgla w stalach wielofazowych jest ograniczona do 0,2%. Spośród stali stosowanych do produkcji samochodów stale typu CP ustępują wytrzymałością jedynie stalom martenzytycznym, jednak plastyczność tych stali jest wyższa w porównaniu ze stalami martenzytycznymi [2, 3]. Publikowane dane literaturowe wskazują, że blachy ze stali CP powinny charakteryzować się następującymi właściwościami mechanicznymi [1–3]:

- $R_e$  od 600 MPa do 700 MPa,
- $R_m$  od 800 MPa do 900 MPa,

- brakiem wyraźnej granicy plastyczności,
- wartością stosunku  $R_e / R_m$  od 0,7 do 0,8,
- wydłużeniem całkowitym od 10% do 15%.

Dla uzyskania pożądanych właściwości wyrobów ze stali wielofazowej niezbędne jest precyzyjne sterowanie parametrami obróbki cieplno-plastycznej począwszy od nagrzewania wsadu przed odkształcaniem, poprzez parametry walcowania, temperaturę w kolejnych etapach walcowania oraz parametry chłodzenia w czasie i po zakończeniu walcowania.

Dla ograniczenia i ukierunkowania badań wstępne wytyczne prób walcowania blach w linii do półprzemysłowej symulacji procesów wytwarzania stopów metali i wyrobów metalowych (LPS – moduł B) opracowano w oparciu o wyniki badań dylatometrycznych i symulacji fizycznych procesu odkształcania i chłodzenia dla wstępnie zaprojektowanego składu chemicznego stali wielofazowej [4, 5].

Próby walcowania blach przeprowadzono w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach.

## 2. SYMULACJA FIZYCZNA PROCESU WYTWARZANIA BLACH ZE STALI CP

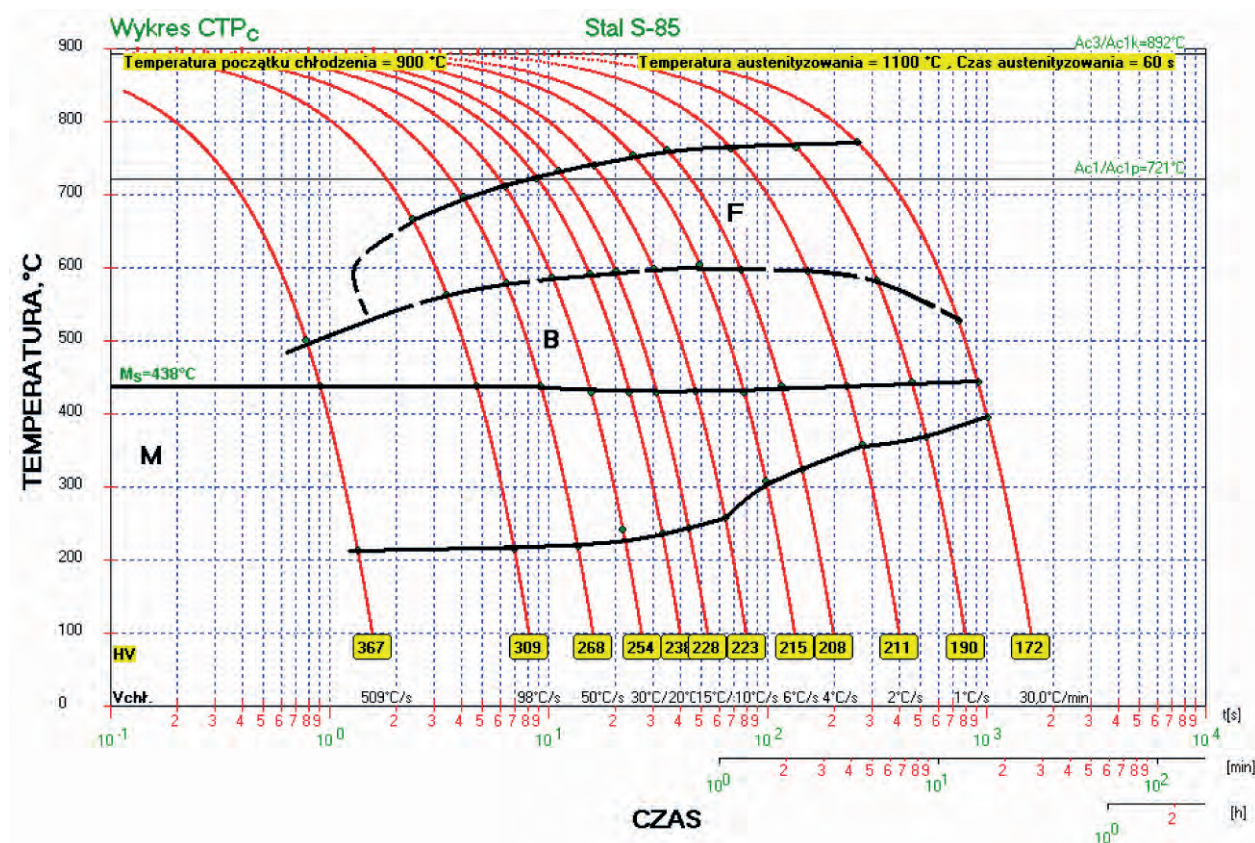
### 2.1. BADANIA DYLATOMETRYCZNE

Materiałem do badań dylatometrycznych za pomocą dylatometru DIL805 A/D i fizycznej symulacji procesu walcowania blach z wykorzystaniem symulatora Gleble 3800 były próbki wykonane ze stali z wstępnie zaprojektowanego, na podstawie danych literaturowych, składu chemicznego stali wielofazowej o podwyższonej do 0,13% zawartości tytanu. Zaprojektowany gatunek stali został wytopiony w piecu VSG100 (linia LPS – moduł A) i odlany we wlewek o przekroju kwadratowym 100 mm × 100 mm. Skład chemiczny stali z wytopu laboratoryjnego oznaczony symbolem S85 zamieszczono w tablicy 1. Wykresy przemian fazowych dla stali S85 w postaci wykresów CTPc i OCTPc zamieszczono na rysunkach 1 i 2 [4]. Analiza dylatogramów otrzymanych dla próbek po austenityzowa-

Tablica 1. Składy chemiczne stali CP z wytopów laboratoryjnych, % masowe

Table 1. Chemical composition of laboratory ingots of CP steels, in mass %

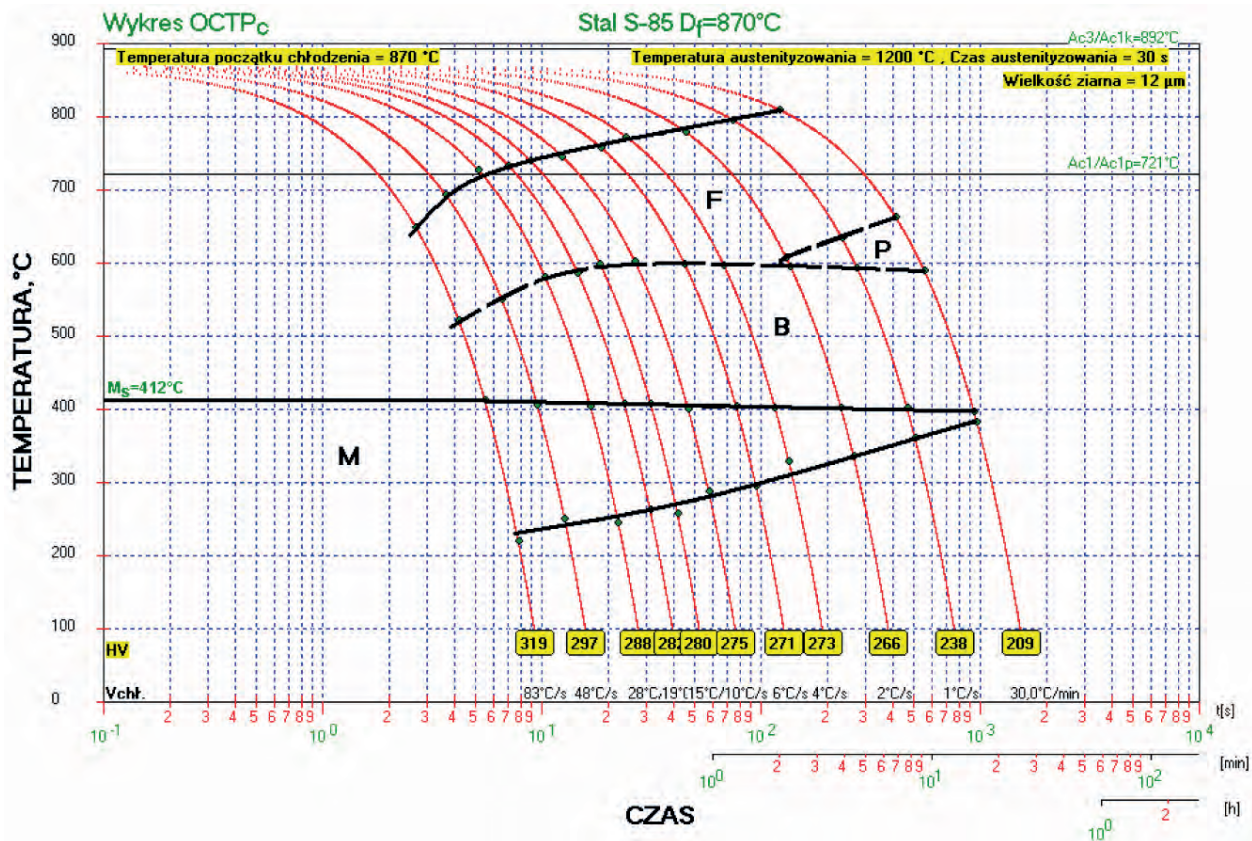
Numer wytopu	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Ti	Cu	Al <sub>całk.</sub>	N O	
														ppm	ppm
S85	0,10	1,55	0,41	0,011	0,011	0,32	0,22	<0,01	0,005	<0,01	0,13	0,045	0,22	27	8
S205	0,10	1,53	0,44	0,007	0,008	0,41	0,23	0,007	0,007	<0,01	0,11	0,18	0,038	36	9
S208	0,10	1,55	0,43	0,006	0,008	0,40	0,24	0,02	0,042	<0,01	0,016	0,17	0,042	35	11
S209	0,10	1,53	0,43	0,007	0,007	0,40	0,26	<0,01	0,002	0,04	0,009	0,17	0,040	37	9
S224	0,11	1,50	0,45	0,009	0,010	0,40	0,26	0,01	0,035	<0,01	0,12	0,18	0,041	34	8
S226	0,11	1,54	0,45	0,009	0,010	0,40	0,26	0,01	0,035	<0,01	0,12	0,18	0,019	35	10



Rys. 1. Wykres CTP<sub>c</sub> stali z wytopu S85 [2]

Fig. 1. TTT<sub>c</sub> diagram of S85 steel [2]





Rys. 2. Wykres OCTP<sub>c</sub> stali z wytopu S85 po odkształceniu w temperaturze 870°C [2]

Fig. 2. DTTT<sub>c</sub> diagram of S85 steel after deformation at 870°C [2]

niu w temperaturze 1100°C wykazała, że w zakresie zastosowanych szybkości chłodzenia (od 100°C/s do 0,5°C/s) w strukturze stali występują trzy składniki, tj. ferryt, bainit i martenzyt. Wprowadzenie odkształcenia austenitu nie wpływa zasadniczo na przebieg przemian fazowych. Odkształcenie stali w temperaturze 870°C oddziałuje głównie na nieznaczne przyspieszenie przemiany ferrytycznej i perlitycznej oraz obniżenie temperatury  $M_s$ . Pojawienie się perlitu zaobserwowano po chłodzeniu z szybkościami mniejszymi od 2°C/s.

## 2.2. BADANIA Z WYKORZYSTANIEM SYMULATORA GLEEBLE

Symulacje fizyczne procesu walcowania blach zostały wykonane za pomocą symulatora Gleeble 3800 z wykorzystaniem jednostki Hydrowedge. Doświadczenia sekwencyjnego odkształcania stali z wytopu S85 przeprowadzono na próbkach o wymiarach 15 mm × 20 mm × 35 mm. Sekwencje gniołów w czasie symulacji dobierano w taki sposób, aby po zakończeniu odkształcenia możliwe było pobranie z części odkształcanej próbek wytrzymałościowych o średnicy pomiarowej 3,5 mm przeznaczonych do badań właściwości mechanicznych w próbie rozciągania. Zmiennymi parametrami symulacji fizycznych były: liczba odkształceń, wielkość odkształcenia w kolejnych krokach, temperatura ostatniego odkształcenia oraz sposób chłodzenia po odkształceniu. Liczbę i wielkości gniołów dobrano z uwzględnieniem możliwości technicznych linii LPS – moduł B. Symulacje fizyczne walcowania blach przeprowadzono odkształcając próbki w sześciu lub pięciu

krokach, z zastosowaniem dwóch temperatur ostatniego odkształcenia równych 800°C lub 920°C. Po odkształceniu próbki chłodzono wodą do temperatury 500°C, 450°C lub 400°C i wytrzymywano czasie 1800 s. Po wytrzymaniu w wymienionych temperaturach próbki chłodzono w spokojnym powietrzu.

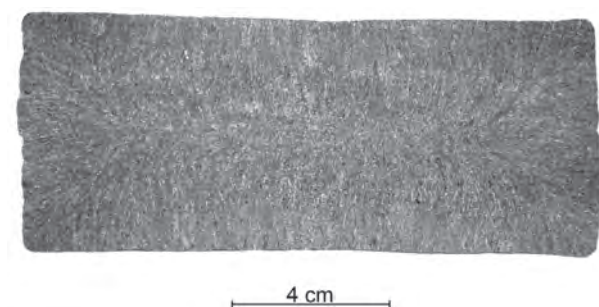
Wyniki badań mikrostruktury próbek doksztalcanych wykazały, że zarówno końcowe odkształcenie w temperaturze 800°C jak i odkształcenie w temperaturze 920°C prowadzi do uzyskania bardzo drobnego ziarna austenitu po ostatnim odkształceniu, poniżej 15 μm. Końcowa struktura stali złożona jest z ferrytu, różnych typów morfologicznych bainitu i martenzytu. Badania właściwości mechanicznych wykazały, że najlepsze właściwości mechaniczne gotowego wyrobu można osiągnąć podczas walcowania z dużymi prędkościami w ostatnich przepustach z temperaturą końca walcowania około 920°C oraz po przyspieszonym chłodzeniu do temperatury 500°C i wytrzymaniu w tej temperaturze w czasie 1800 s. Maksymalna wytrzymałość próbek po przeprowadzonych symulacjach fizycznych procesu walcowania była równa około 900 MPa [4].

## 3. PÓLPRZEMYSŁOWA SYMULACJA PROCESU WALCOWANIA BLACH ZE STALI CP W LINII LPS

### 3.1. MATERIAŁ I ZAKRES PRÓB WALCOWANIA BLACH W LINII LPS

Wyjściowym materiałem do prób walcowania w linii LPS – moduł B były wlewki płaskie 60 mm × 150 mm

× 1020 mm z doświadczalnych stali CP odlane w piecu VSG100. Przed walcowaniem z każdego wlewka odcinano głowę i stopę oraz pobierano tarcze poprzeczne do badań makrostruktury. Składy chemiczne stali CP oznaczonych symbolami S85, S205, S208, S209, S224 i S226 zamieszczono w tablicy 1. Odlane wlewki charakteryzują się zwartą budową wewnętrzną. Nie stwierdzono występowania wad wewnętrznych oraz wad obszaru podpowierzchniowym. We wszystkich wlewkach w środku przekroju poprzecznego występuje szeroka strefa kryształów równoosiowych. Układ poszczególnych stref krystalizacji wlewków laboratoryjnych zbliżony jest do układu stref krystalizacji w płaskich wlewkach ciągłych przeznaczonych do walcowania blach. Przykładowy obraz makrostruktury wlewka stanowiącego wsad do walcowania blach w linii LPS zamieszczono na rysunku 3.



Rys. 3. Makrostruktura na przekroju poprzecznym wlewka z wytopu S224 - głowa wlewka

Fig. 3. Macrostructure on transverse section of ingot from S224 steel - head of ingot

Ze względu na techniczne możliwości linii LPS – moduł B utrudnione jest bezpośrednie walcowanie blach o grubościach mniejszych od 12 mm bezpośrednio z wlewka płaskiego o grubości 60 mm, szczególnie w przypadku, gdy schemat walcowania wymaga zastosowania międzyoperacyjnego przechadzania pasma i/lub wymagane jest wytrzymanie pasma w zakresie temperatury przemian fazowych (w piecu termosie) bezpośrednio po walcowaniu.

Długość pasma pozwalająca na wykorzystanie chłodni natryskowej i pieca termosu nie może być większa od 1800 mm. Z tego względu proces walcowania wlewków na blachy o grubościach 10 mm i 4 mm podzielono na kilka etapów pośrednich obejmujących:

- walcowanie wlewka na płaskownik o grubości 30 mm,
- walcowanie płaskownika o grubości 30 mm na blachę o grubości 10 mm oraz na blachę o grubości 12 mm stanowiącą materiał wyjściowy do walcowania blach o grubości 4 mm,
- walcowanie blachy o grubości 4 mm z blachy o grubości 12 mm.

Biorąc pod uwagę wyniki badań dylatometrycznych i symulacji fizycznych procesu walcowania stali S85 uzyskane za pomocą symulatora Gleeble założono, że proces walcowania blach o grubościach 10 mm i 4 mm będzie wykonany w pięciu przepustach i powinien być kończony w zakresie temperatury od 920°C do 800°C, z następnym chłodzeniem pasma z szybkością od 10°C/s do 50°C/s do temperatury otoczenia lub do zakresu temperatury 450–550°C, wytrzymaniem w tym zakresie temperatury, a następnie intensywnym chłodzeniem do temperatury otoczenia lub chłodzeniem w spokojnym powietrzu. Schematy walcowania obejmujące liczbę przepustów, wielkość gniotu w kolejnych przepustach zamieszczono w tablicach 2 i 3. Zaplanowane warianty chłodzenia blach po walcowaniu były następujące:

- **Wariant 1:** chłodzenie natryskiem wody z intensywnością 150 l/min do temperatury otoczenia,
- **Wariant 2:** chłodzenie natryskiem wody z intensywnością 150 l/min do temperatury około 520°C, włożenie do pieca o temperaturze 500°C i wytrzymanie w czasie 0,5 godziny. Po wyjęciu z pieca chłodzenie w spokojnym powietrzu,
- **Wariant 3:** chłodzenie natryskiem wody z intensywnością 150 l/min do temperatury około 520°C i po wytrzymaniu na samotoku przez około 60 s chłodzenie wodą z intensywnością 300 l/min do temperatury otoczenia.

Tablica 2. Parametry walcowania blach grubości 10 mm ze stali wielofazowej zastosowane w linii LPS – moduł B

Table 2. Parameters of hot rolling of 10 mm plates from multi-phase CP steel used in LPS line – module B

Przepust	Grubość po przepuście, mm	Gniot, %	Odkształcenie rzeczywiste	Czas przerw pomiędzy przepustami, s
wsad	30,0	-	-	-
1	25,0	16,7	0,17	5
2	19,0	24,0	0,26	5
3	15,0	21,1	0,23	6
4	11,8	21,3	0,23	7
5	9,8	16,9	0,18	

Tablica 3. Parametry walcowania blach o grubości 4 mm ze stali wielofazowej w linii LPS – moduł B

Table 3. Parameters of hot rolling of 4 mm plates from multi-phase CP steel used in LPS line – module B

Przepust	Grubość po przepuście, mm	Gniot, %	Odkształcenie rzeczywiste	Czas przerw pomiędzy przepustami, s
wsad	12,0	-		-
1	9,5	20,8	0,23	5
2	6,9	27,2	0,32	5
3	5,0	27,5	0,32	5
4	3,8	24,0	0,27	5
5	3,2	15,8	0,17	



Założone intensywności chłodzenia pozwalają na uzyskanie w środku przekroju blach o grubości 10 mm w zakresie temperatury 860°C/920°C – 500°C/450°C oraz blachy o grubości 4 mm w zakresie temperatury 770°C/740°C – 500°C/450°C następujących szybkości chłodzenia: dla blachy o grubości 10 mm przy intensywności natrysku 150 l/min – 15°C/s, dla blachy o grubości 10 mm przy intensywności natrysku 300 l/min – 35°C/s, dla blachy o grubości 4 mm przy intensywności natrysku 150 l/min – 30°C/s, dla blachy o grubości 4 mm przy intensywności natrysku 150 l/min – 70°C/s. Zgodnie z wynikami badań dylatometrycznych założone szybkości chłodzenia (15°C/s – 70°C/s) obejmują zakres szybkości pozwalających na wytworzenie struktury ferrytyczno-bainityczno-martezytycznej lub bainityczno-ferrytyczno-martezytycznej w stali o składzie chemicznym S85.

Temperaturę pasma w czasie walcowania i po chłodzeniu mierzono za pomocą pirometrów stacjonarnych zainstalowanych w linii LPS – moduł B oraz pirometru przenośnego Impac.

Wlewki oraz odcinki blach o grubościach 30 mm i 12 mm przeznaczone do walcowania odpowiednio blach o grubościach 10 mm i 4 mm wygrzewano w temperaturze 1200°C.

### 3.2. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE BLACH ZE STALI CP

Właściwości mechaniczne blach badano na pięciokrotnych próbkach płaskich wycinanych równolegle do kierunku walcowania. Statyczną próbę rozciągania wykona-

no za pomocą maszyny wytrzymałościowej Zwick Z250. Wyniki badań właściwości mechanicznych zamieszczono w tablicy 4.

Odcwalcowane blachy charakteryzują się zmiennym poziomem właściwości mechanicznych w zależności od składu chemicznego stali, schematu walcowania i końcowej grubości. W blachach o grubości 10 mm ze stali S205, S208, S209 i S224, chłodzonych po walcowaniu natryskiem wody (wariant 1) najlepsze połączenie wysokiej wytrzymałości i plastyczności uzyskano w blachach ze stali S224 zawierającej 0,12% tytanu i dodatków wanadu w ilości 0,035%. W blasze z tej stali wartości  $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A_5$  i  $A_{gt}$  są równe odpowiednio 560 MPa, 875 MPa, 19,4% i 10,3%. Niższe właściwości wytrzymałościowe przy wyższej plastyczności wykazują blachy ze stali S208 i S209 o typowej dla stali mikroskopowych zawartości tytanu (0,009–0,016%) z dodatkiem wanadu (wytop S208) lub niobu (wytop S209) oraz ze stali S205 nie zawierającej wanadu i o podwyższonej do 0,11% zawartości tytanu. W blachach ze stali S205, S208 i S209 wartości  $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A_5$  oraz  $A_{gt}$  mieszczą się odpowiednio w przedziałach 485 MPa do 495 MPa, od 786 MPa do 803 MPa, od 20,3% do 22,7% oraz od 10,2% do 12,9%. Istotny wzrost wytrzymałości blach z jednoczesnym obniżeniem ich plastyczności stwierdzono w blachach poddanych, po walcowaniu na gorąco wytrzymaniu w temperaturze 500°C (chłodzenie według wariantów 2 i 3). W blachach ze stali S205, S208 i S209 zastosowanie wytrzymania izotermicznego w zakresie przemiany bainitycznej prowadzi do uzyskania blach charakteryzujących się wytrzymałością na rozciąganie w zakresie od 800 MPa do 863 MPa i wydłużeniem  $A_5$

Tablica 4. Właściwości mechaniczne blach o grubości 10 mm i 4 mm ze stali wielofazowej po walcowaniu na gorąco i kontrolowanym chłodzeniu w linii LPS – moduł B

Table 4. Mechanical properties of 10 mm and 4 mm plates from multi-phase CP steels after hot rolling and controlled cooling in LPS line – module B

Nr wytopu	Grubość blachy mm	Temperatura końca walcowania °C	Wariant chłodzenia	$R_{p0,2}$ MPa	$R_m$ MPa	$A_5$ %	$A_{gt}$ %
S205	10	800	Wariant 1	485	803	20,3	11,4
			Wariant 2	567	863	19,1	11,3
			Wariant 3	540	824	18,7	9,2
S205	4	760	Wariant 1	528	761	14,5	7,9
			Wariant 2	568	835	16,3	11,0
			Wariant 3	582	871	13,2	4,3
S208	10	780	Wariant 1	497	791	21,4	10,2
			Wariant 2	526	806	12,4	6,8
S208	4	770	Wariant 2	605	820	15,2	6,4
			Wariant 3	610	886	14,0	8,7
S209	10	920	Wariant 1	495	786	22,7	12,9
			Wariant 2	548	800	14,3	8,2
			Wariant 3	582	824	13,4	7,3
S209	4	780	Wariant 1	528	710	21,2	13,1
			Wariant 2	563	802	17,2	9,2
			Wariant 3	621	889	14,2	5,2
S224	10	870	Wariant 1	560	875	19,4	10,3
			Wariant 2	590	900	17,7	8,2
			Wariant 3	590	922	16,0	6,5
S224	4	760	Wariant 1	560	872	20,6	11,4
			Wariant 2	580	890	18,0	6,9
			Wariant 3	627	957	16,2	6,5

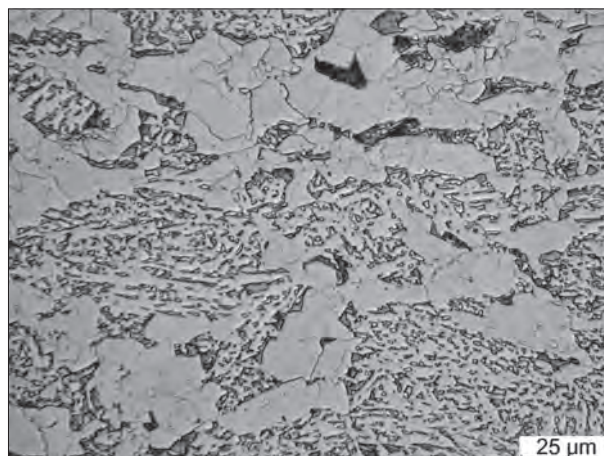
od 12,4% do 19,1%. Najwyższą wytrzymałością wykazują blachy ze stali z wytopu S224. W blasze z tej stali wartości  $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A_5$  oraz  $A_{gt}$  są równe odpowiednio 590 MPa, 900 MPa – 922 MPa, 17,7% – 16% oraz 6,5% – 8,2%.

Analogicznie jak w blachach o grubości 10 mm, również w przypadku blach o grubości 4 mm zastosowanie po walcowaniu na gorąco chłodzenia według wariantów 2 i 3 prowadzi do istotnego wzrostu właściwości wytrzymałościowych i obniżenia plastyczności. Z porównania właściwości blach o grubości 4 mm chłodzonych zgodnie z wariantami 2 i 3 wynika, że zastosowanie chłodzenia według wariantu 3 pozwala na uzyskanie blach o wyższej wytrzymałości przy nieznacznie niższej plastyczności, niż po wytrzymaniu w temperaturze 500°C w czasie 0,5 h. Chłodzone według wariantu 2 blachy ze stali nie zawierającej wanadu (wytop S205), z dodatkiem wanadu (wytop S208), dodatkiem niobu (wytop S209) oraz ze stali z dodatkami wanadu i tytanu (wytop S224) charakteryzują się wytrzymałością na rozciąganie równą odpowiednio 835 MPa, 820 MPa, 802 MPa i 890 MPa przy wydłużeniu  $A_5$  równym odpowiednio 16,3%, 15,2%, 17,2% i 18,0%. Zastosowanie krótkotrwałego wytrzymania w czasie 60 s w temperaturze około 500°C i dalsze intensywne chłodzenie do temperatury otoczenia spowodowało wzrost wytrzymałości blach o około 36–90 MPa z jednoczesnym obniżeniem wydłużenia  $A_5$  w zakresie 1–3%. Najlepsze połączenie wysokiej wytrzymałości i plastyczności uzyskano w blachach o grubości 4 mm ze stali S224 chłodzonych po walcowaniu według wariantu 3. Dla tej blachy wartości  $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_5$  wynoszą odpowiednio 627 MPa, 957 MPa i 16,2%.

### 3.3. WYNIKI BADAŃ MIKROSTRUKTURY BLACH ODWALCOWANYCH ZE STALI CP

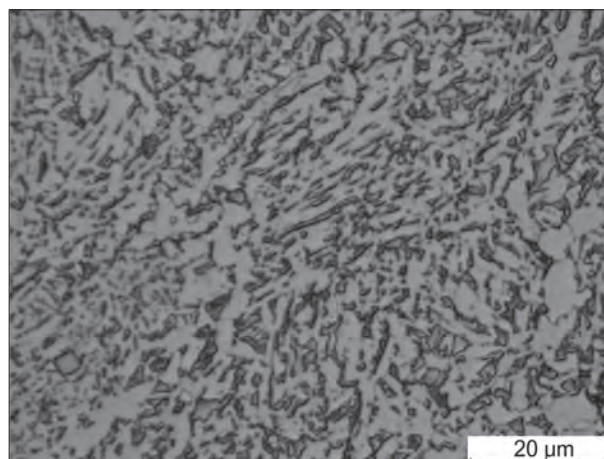
Badania mikrostruktury blach wykonano na próbkach pobranych z próbek wytrzymałościowych z części nieodkształconej. Zgłady po trawieniu w nitalu badano za pomocą mikroskopu świetlnego Neophot 2 oraz mikroskopu skaningowego.

Przeprowadzone obserwacje z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego wykazały, że struktura odwalcowanych blach jest mieszaniną ferrytu i bainitu o zmiennej zawartości obu składników w zależności od grubości blachy i sposobu chłodzenia po walcowaniu. W blachach o grubości 10 mm po chłodzeniu w spokojnym powietrzu struktura złożona jest z drobnych równoosiowych ziaren ferrytu i obszarów bainitycznych (rys. 4). Zastosowanie po walcowaniu na gorąco przyspieszonego chłodzenia (wariant 1) prowadzi do zwiększenia udziału bainitu (rys. 5). Największy udział bainitu stwierdzono w blachach chłodzonych z zastosowaniem wariantów 2 i 3 (rys. 6). Zbliżone zmiany we wzajemnych proporcjach ferrytu i bainitu w zależności od zastosowanego sposobu chłodzenia obserwowano w blachach o grubości 4 mm. Najwyższy udział bainitu równy 71,8% i 75,8% stwierdzono w blasze ze stali S224 chłodzonej wg wariantu 3 (rys. 7). Zastosowanie chłodzenia zgodnie z wariantem 2 prowadzi do zmniejszenia udziału bainitu. W przypadku blachy ze stali S244 udział bainitu po wytrzymaniu w temperaturze 500°C w czasie 0,5 godz. jest równy 42,2% (rys. 8). Wykonane badania mikrostruktury za pomocą mikroskopu świetlnego i skaningowego nie pozwoliły w jednoznacz-



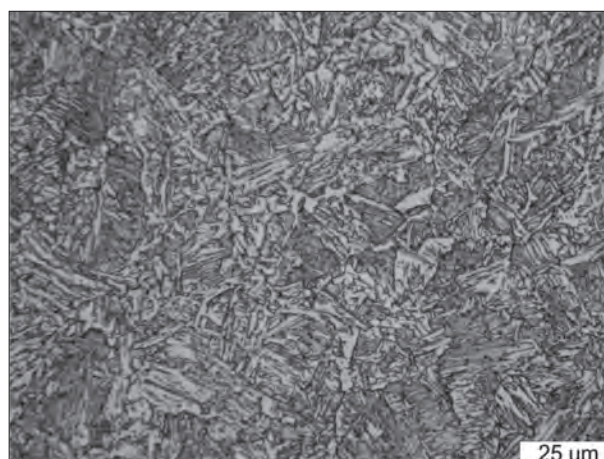
Rys. 4. Mikrostruktura na przekroju poprzecznym blachy o grubości 10 mm ze stali S224 po chłodzeniu w powietrzu

Fig. 4. Microstructure on transverse section of 10 mm plate from S224 steel after air cooling



Rys. 5. Mikrostruktura na przekroju poprzecznym blachy o grubości 10 mm ze stali S224 po przyspieszonym chłodzeniu do temperatury 20°C

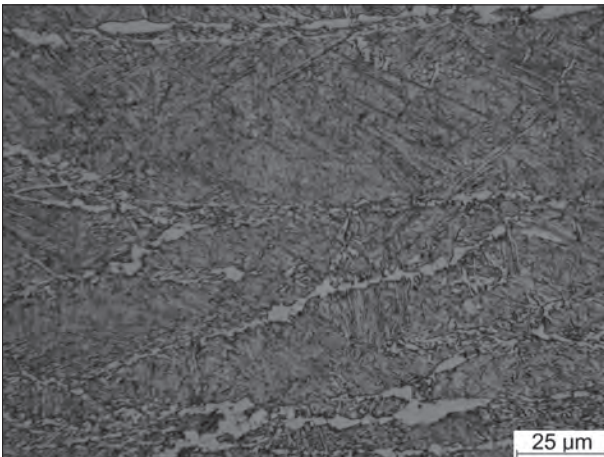
Fig. 5. Microstructure on transverse section of 10 mm plate from S224 steel after accelerated cooling to 20°C



Rys. 6. Mikrostruktura na przekroju poprzecznym blachy o grubości 10 mm ze stali S224 po przyspieszonym chłodzeniu do temperatury 500°C, wytrzymaniu w tej temperaturze w czasie 0,5 godz. i przyspieszonym chłodzeniu do temperatury 20°C

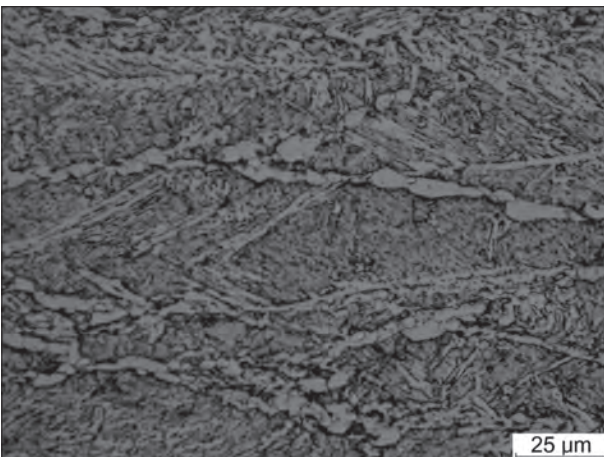
Fig. 6. Microstructure on transverse section of 10 mm plate from S224 steel after accelerated cooling to 500°C, holding at this temperature for 0.5 h and accelerated cooling to 20°C





Rys. 7. Mikrostruktura na przekroju poprzecznym blachy o grubości 4 mm ze stali S224 po przyspieszonym chłodzeniu do temperatury 500°C, wytrzymaniu w tej temperaturze w czasie 60 s i przyspieszonym chłodzeniu do temperatury 20°C

Fig. 7. Microstructure on transverse section of 4 mm plate from S224 steel after accelerated cooling to 500°C, holding at this temperature for 60 s and accelerated cooling to 20°C



Rys. 8. Mikrostruktura na przekroju poprzecznym blachy o grubości 4 mm ze stali S224 po przyspieszonym chłodzeniu do temperatury 500°C, wytrzymaniu w tej temperaturze w czasie 0,5 h i chłodzeniu w powietrzu do temperatury 20°C

Fig. 8. Microstructure on transverse section of 4 mm plate from S224 steel after accelerated cooling to 500°C, holding at this temperature for 0.5 h and air cooling to 20°C

ny sposób zidentyfikować występowania martenzytu spodziewanego w blachach chłodzonych wg wariantu 3, chociaż jego występowanie stwierdzono z analizy dylatogramów oraz badań metaloznawczych próbek ze stali S85. Prawdopodobnie martenzyt występuje w postaci wąskich pasm wewnątrz obszarów bainitu.

#### 4. WYTYCZNE DO PRZEMYSŁOWEJ TECHNOLOGII WALCOWANIA BLACH ZE STALI WIELOFAZOWEJ

Ze względu na różnice pomiędzy warunkami walcowania w półprzemysłowej linii LPS – moduł B i w linii przemysłowej, wynikające m.in. z masy i wymiarów wsadu oraz możliwości technicznych zespołów walcow-

niczych (moc walcarek), które determinują wielkości gniotów w kolejnych przepustach, nie jest możliwe podanie ostatecznych wartości parametrów przemysłowego procesu walcowania w postaci tabel przepustów. Tabele takie muszą być opracowane dla konkretnej linii walcowniczej, natomiast sposób chłodzenia może zostać przeniesiony bezpośrednio do walcowni przemysłowych.

Przedstawione poniżej wytyczne odnośnie do temperatury początku i końca walcowania oraz sposobu chłodzenia po walcowaniu pozwalają na wyprodukowanie blach o grubościach 10 mm i 4 mm o właściwościach zamieszczonych w tablicy 4.

##### Chłodzenie po walcowaniu blach o grubości 10 mm i 4 mm – wariant I

- temperatura nagrzewania wsadu: 1200°C,
- temperatura końca walcowania: 920–880°C,
- bezpośrednio po walcowaniu na gorąco chłodzenie pasma do temperatury w zakresie 550–500°C z szybkością 15–20°C/s,
- wytrzymanie (swobodne stygnięcie w powietrzu w zakresie temperatury 500–450°C w czasie 60 s
- chłodzenie pasma z szybkością 40–50°C/s do temperatury otoczenia.

Zastosowanie wariantu I wymaga wyposażenia linii walcownia w chłodnię natryskową zainstalowaną za ostatnią klatką walcowniczą oraz tunelu termicznego umożliwiającego wytrzymanie lub powolne stygnięcie pasma w temperaturze 500–450°C.

##### Chłodzenie po walcowaniu blach o grubości 10 mm i 4 mm – wariant II

- temperatura nagrzewania wsadu: 1200°C,
- temperatura końca walcowania: 800–770°C,
- przyspieszone chłodzenie od temperatury końca walcowania szybkością 15–20°C/s do temperatury w zakresie 550–500°C i wytrzymanie w tym zakresie w czasie 0,5 godz.

Zastosowanie wariantu II wymaga wyposażenia linii walcownia w chłodnię natryskową zainstalowaną za ostatnią klatką walcowniczą oraz pieca grzewczego umożliwiającego wytrzymanie odwalcowanego pasma.

#### 4. PODSUMOWANIE

Testowana metoda półprzemysłowej symulacji walcowania blach z wykorzystaniem linii LPS umożliwia w warunkach laboratoryjnych weryfikację w skali laboratoryjnej opracowanych na podstawie symulacji numerycznych i/lub fizycznych technologii procesu walcowania na gorąco oraz technologii obróbki cieplno-mechanicznej wytwarzania blach o grubości do 4 mm. Jednakże, ze względu na różnice pomiędzy warunkami walcowania w półprzemysłowej linii LPS – moduł B i w linii przemysłowej, wynikające m.in. z masy i wymiarów wsadu oraz możliwości technicznych zespołów walcowniczych, które determinują wielkości gniotów w kolejnych przepustach, na obecnym etapie badań nie jest możliwe podanie ostatecznych wartości parametrów przemysłowego procesu walcowania. Tym niemniej wykorzystanie linii LPS – moduł B pozwala na opracowanie wstępnych technologii przemysłowych, zawężenie zakresu prób przemysłowych, a tym samym na znaczące obniżenie kosztów badań związanych z wprowadzeniem nowego asortymentu blach.

Wykonane badania właściwości mechanicznych blach o grubościach 10 mm i 4 mm wykazały, że najkorzystniejszy zespół właściwości mechanicznych uzyskano dla stali z wytopu, S224 zawierającej 0,12% tytanu i 0,035% wanadu. Dla blach o grubości 10 mm najlepsze połączenie wysokiej wytrzymałości i plastyczności uzyskano po operacji obejmującej przyspieszone chłodzenie do temperatury 500°C po walcowaniu na gorąco, wytrzymanie w tej temperaturze w czasie 0,5 godz. i dalsze chłodzenie w spokojnym powietrzu. Po takim procesie chłodzenia blachy ze stali S224 charakteryzowały się wartościami  $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_5$  odpowiednio 590 MPa, 900 MPa i 17,7%. W przypadku blach o grubości 4 mm ze stali S224 wysokie właściwości mechaniczne,  $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_5$  równe odpowiednio 627 MPa, 957 MPa i 16,2% uzyskano operacji przyspieszonego chłodzenia do temperatury 500°C, wytrzymaniu w tej temperaturze w czasie 60 s i następnym intensywnym chłodzeniem do tempe-

ratury otoczenia. Wysokie właściwości wytrzymałościowe blach są wynikiem przede wszystkim wytworzenia drobnoziarnistej struktury bainityczno-ferrytycznej oraz umocnieniem wydzieleniowym cząstkami węglikoazotków wanadu.

***Publikacja została opracowana na podstawie pracy wykonanej w projekcie badawczo-rozwojowym nr N R07 0008 04 pt. „Opracowanie podstaw przemysłowych technologii kształtowania struktury i właściwości wyrobów z metali i stopów z wykorzystaniem symulacji fizycznej i numerycznej” finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, realizowanym przez Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach (koordynator), Akademię Górniczo-Hutniczą, Politechnikę Częstochowską, Politechnikę Śląską i Politechnikę Warszawską.***

#### LITERATURA

1. Adamczyk J., Grajcar A.: Blachy stalowe dla przemysłu samochodowego, Hutnik, 2005, nr 3, s. 170
2. Mesplont C., De Cooman B.C., Vandeputte S.: Microstructure-properties relationships in complex phase cold rolled high strength steels, Iron and Steelmaker, 2002, t.29, nr 2, s.39
3. Pysmintsev I.Y., Mesplont Ch., Jacobs S., De Cooman B.: Microstructure and properties of hot-rolled high strength multiphase steels for automotive application, Steel Research, 2002, nr 73, s. 392
4. Zalecki W., Molenda R.: Sprawozdanie IMŻ z pracy PR-0015-11 pt.: Opracowanie numerycznego modelu przemian fazowych zachodzących w stali wielofazowej, cz. 2, listopad 2009, niepublikowane
5. Pidvysots'kyy V., Kuziak R., Zalecki W., Molenda R.: Sprawozdanie IMŻ z pracy PR-0015-12 pt.: „Wykonanie symulacji fizycznej walcowania blach ze stali konstrukcyjnej wielofazowej z zastosowaniem symulatora Gleeble 3800”, cz. 3, kwiecień 2010, niepublikowane