

WPŁYW MIKROSTRUKTURY NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI NOWOCZESNYCH STALI KONSTRUKCYJNYCH AHSS

Głównym celem pracy było zbadanie wpływu morfologii bainitu na wybrane właściwości stali AHSS, w tym odporności na ścieranie. Motywacją do podjęcia pracy była potrzeba zbadania przemiany bainitycznej zachodzącej w badanych stalach w warunkach izotermicznych, co ma szczególne znaczenie w technologii wytwarzania np. stali TRIP. Zbadano przebieg przemiany bainitycznej wybranych stali w warunkach izotermicznych. Na podstawie wyników badań dylatometrycznych i mikrostruktury opracowano wykresy TTT dla przemiany bainitycznej. Przeprowadzone badania ścieralności wykazały, że doświadczalna, bainityczna stal na szyny charakteryzuje się półtora raza większą odpornością na ścieranie w porównaniu do konwencjonalnej stali szynowej 900A. Zbadanie wysokotemperaturowych właściwości stali pozwoliło określić skłonność do tworzenia pęknięć, a tym samym określić podatność tych stali do spawania.

Słowa kluczowe: stal bainityczna, przemiana fazowa, dylatometria, odporność na ścieranie

INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE ON SOME PROPERTIES OF AHSS STEELS

The main aim of the work was to investigate the influence of bainite morphology on some properties of AHSS steels, including wear resistance. The motivation for the work was the need to study bainitic transformation under isothermal conditions, what is of particular importance in the manufacturing technology of e.g. TRIP steels. The bainitic transformation in some steels under isothermal conditions was investigated. The data obtained from dilatometric tests analysis and metallographic investigations were used to create TTT diagrams for bainitic transformation. The performed wear resistance tests have shown that experimental bainitic rail steel has revealed one and a half better wear resistance in comparison to conventional 900A steel for rails. Investigation of high temperature properties made it possible to determine the steel's tendency to cracking, i.e. their sensibility to welding.

Keywords: bainitic steel, phase transformation, dilatometry, wear resistance

1. WPROWADZENIE

Od kilku lat w Instytucie realizowane były prace, w których przedmiotem były niskowęglowe stale bainityczne różniące się składem chemicznym, w tym rodzajem i ilością wprowadzonych mikrododatków (Ti, Nb, V) odpowiedzialnych za proces utwardzania stali, w zależności od ich zastosowania.

W dotychczasowych badaniach skupiano się głównie na opracowaniu matematycznych modeli przemian fazowych, w tym opracowywano narzędzia pomocne w analizie danych doświadczalnych i niezbędne do budowy tych modeli [1, 2]. W ramach projektu „Bainhard” [3] zdefiniowano pojęcie i opracowano sposób wyznaczania „hartowności bainitycznej”. Synergiczne oddziaływanie składu chemicznego na twardość w nowoczesnych stalach bainitycznych badano między innymi w pracy [4].

Badania przemian fazowych prowadzono głównie w warunkach chłodzenia ciągłego, natomiast technologia wytwarzania np. stali typu TRIP wymaga znajomości przebiegu przemiany bainitycznej również w warunkach izotermicznych. Ponadto podczas chłodzenia

ciągłego zaobserwowano tworzenie bainitu o różnej morfologii, która z pewnością będzie wpływała na właściwości mechaniczne i technologiczne stali.

O wdrożeniu nowoczesnych stali AHSS, w tej grupie stali DP, TRIP, CP, a także bainitycznych stali na szyny decydują ich właściwości technologiczne. W szczególności dotyczy to spawalności stali AHSS, a w przypadku stali bainitycznych na szyny również odporności na ścieranie.

Dlatego motywacją do podjęcia pracy była potrzeba zbadania przemiany bainitycznej zachodzącej w badanych stalach w warunkach izotermicznych, co ma szczególne znaczenie w technologii wytwarzania stali TRIP, określenie wpływu morfologii bainitu na odporność stali na ścieranie, a także zbadanie podatności stali AHSS do spawania.

Głównym celem pracy było zbadanie wpływu morfologii bainitu na wybrane właściwości stali AHSS, w tym odporności na ścieranie, a także podatności tych stali do spawania.

Zatem zakres prowadzonych prac obejmował między innymi:

- przeprowadzenie badań przemiany bainitycznej w warunkach izotermicznych;
- przeprowadzenie badań ścieralności dla wybranych stali;
- badania parametrów charakteryzujących wybrane stale AHSS w wysokiej temperaturze (NST, NDT, DRT, BTR);

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań w niniejszej pracy były trzy gatunki stali. Skład chemiczny przedstawiono w tabeli 1.

Badania przemiany bainitycznej w warunkach izotermicznych przeprowadzono za pomocą dylatometru DIL805A/D, na próbkach rurkowych $\phi 4 \times \phi 2 \times 10$ mm. Nagrzewanie oraz wytrzymanie w zadanej temperaturze przeprowadzono w próżni. Pomiar temperatury wykonywano za pomocą termoelementu typu S.

Badania metalograficzne wykonano na zglądach metalograficznych trawionych w 3% roztworze nitalu. Obserwacje mikrostruktury przeprowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego firmy Olympus DSX500i (obrazy LOM). Dla wybranych próbek wykonano również badania mikrostruktury z wykorzystaniem wysokorozdzielczego skaningowego mikroskopu elektronowego Inspect F (firmy FEI, obrazy SEM).

Pomiary twardości przeprowadzono za pomocą twardościomierza Future-Tech FM-700, wgłębniakiem Vickersa (HV), przy obciążeniu 98N. Na każdej próbce wykonano po 4 odciski.

Badania odporności na ścieranie przeprowadzono zgodnie z normą PN-82/H-04332. Eksperymenty zużycia tarcowego przeprowadzono na prototypowym urządzeniu, którego zasada działania jest identyczna jak trybometru Amslera. Przeciwpóbkę stanowił walec o promieniu 25 mm i wysokości 20 mm wykonany ze stali narzędziowej NC11 – obrobionej cieplnie na twardość 58HRC.

Badania NST, NDT, DRT i BTR przeprowadzono za pomocą symulatora Gleeble 3800, w oparciu o metodykę opracowaną na podstawie not aplikacyjnych DSI Inc. i badania własne [5–9].

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. WYNIKI BADAŃ DYLATOMETRYCZNYCH I METALOGRAFICZNYCH STALI BAINITYCZNYCH W WARUNKACH IZOTERMICZNYCH

Stal S369

Badania dylatometryczne przemiany bainitycznej stali S369 w warunkach izotermicznych wskazują, że przemiana ta rozpoczyna się najszybciej przy temperaturze 400°C (Rys. 1). Obrazy mikrostruktury zareje-

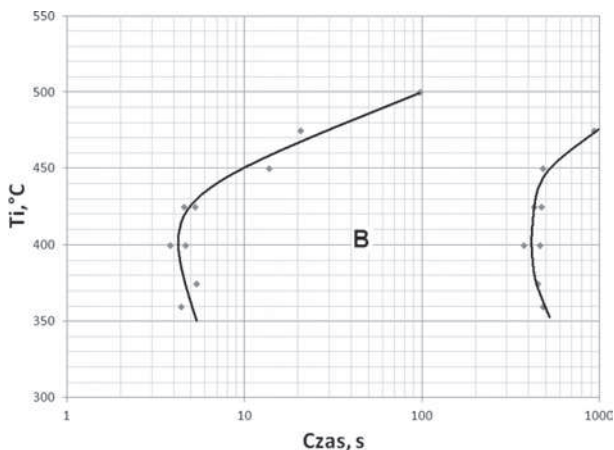
strowane metodami mikroskopii świetlnej i elektronowej (SEM, Rys. 2) wskazują, że struktura próbki schłodzonej szybko z temperatury austenitowania 950°C (w czasie 900s) i wytrzymanej izotermicznie przy temperaturze 400°C (30 min.) złożona jest z bainitu (głównie górnego) i austenitu szczątkowego. Podwyższenie temperatury wytrzymania izotermicznego do 450°C i wyżej powoduje stabilizację austenitu, który podczas chłodzenia ulega przemianom w martenzyt (Rys. 3). Morfologia bainitu zmienia się z górnego w ziarnisty.

Stal X81

Stale X81 i X83 były wstępnie wybranymi gatunkami doświadczalnymi z przeznaczeniem do produkcji szyn bainitycznych. Temperatura M_s stali X81 wyznaczona podczas chłodzenia od temperatury 980°C wynosi 350°C. Przedstawiony na rys. 4 wykres pokazuje, że przemiana bainityczna rozpoczyna się najszybciej przy temperaturze 375°C.

Obrazy mikrostruktury zarejestrowane metodami mikroskopii świetlnej i elektronowej SEM (Rys. 5) wskazują, że struktura próbki schłodzonej szybko z temperatury austenitowania 950°C (w czasie 900 s) i wytrzymanej izotermicznie przy temperaturze 375°C (16 h) złożona jest z bainitu (głównie górnego, miejscami dolnego) i austenitu szczątkowego. Część austenitu podczas chłodzenia przemienia się w martenzyt. Podwyższenie temperatury wytrzymania izotermicznego do 450°C i wyżej powoduje stabilizację austenitu, który podczas chłodzenia ulega przemianom w martenzyt. Morfologia bainitu zmienia się z górnego w ziarnisty.

Dalsze podwyższenie temperatury wyżarzania izotermicznego do 500°C prowadzi do pojawienia się produktów przemiany perlitycznej, głównie po granicach ziarn byłego austenitu (Rys. 6a). Udział bainitu (ziarnistego) jest niewielki, a w strukturze przeważa martenzyt powstały podczas chłodzenia do temperatury otoczenia. Udział perlitu staje się dominujący po wyżarzaniu przy



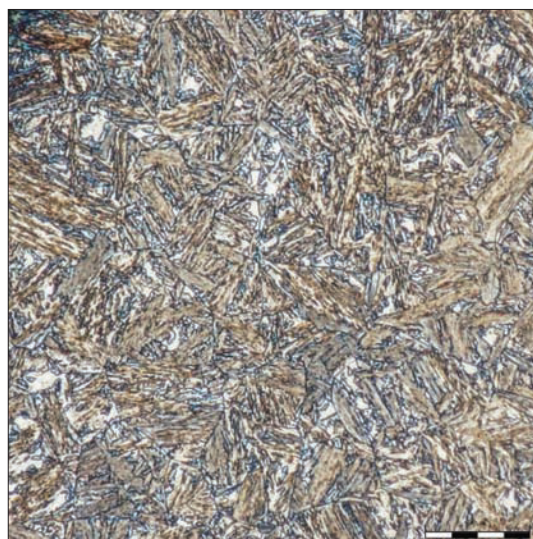
Rys. 1. Wykres CTPi doświadczalnej stali konstrukcyjnej S369 w zakresie przemiany bainitycznej

Fig. 1. TTT diagram of the experimental structural steel S369 in the range of bainitic transformation

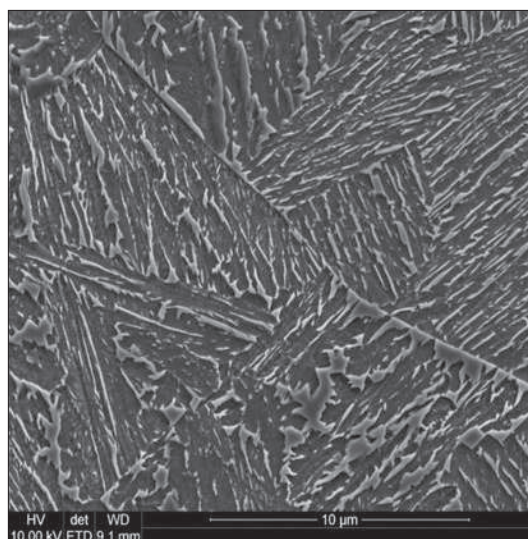
Tabela 1. Skład chemiczny badanych wytopów, % mas.

Table 1. Chemical composition of steels in this study, wt%

	C	Si	Mn	P max	S max	Cr	Ni	Mo	Ti	B	Al.	Cu	N
S369	0,23	0,98	1,52	0,01	0,14	1,51	0,07	0,14	-			0,01	0,009
X81	0,27	0,99	1,55	0,009	0,007	1,52			0,020	0,0025	0,021		0,005
X83	0,34	1,01	1,09	0,011	0,008	1,51	0,40	0,20	0,17	0,0023	0,42	0,30	0,006

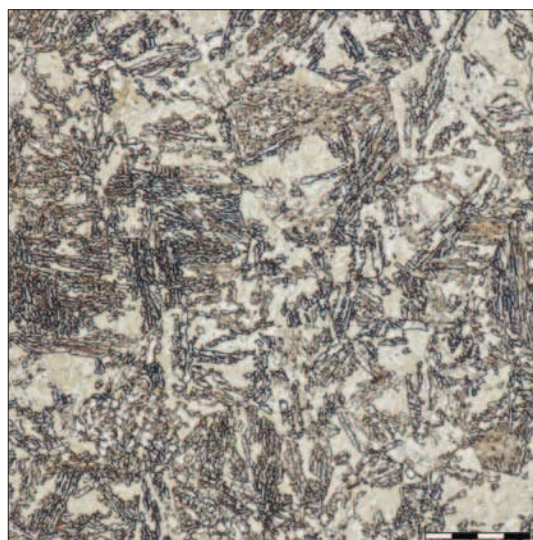


a) LOM, powiększenie 1387×

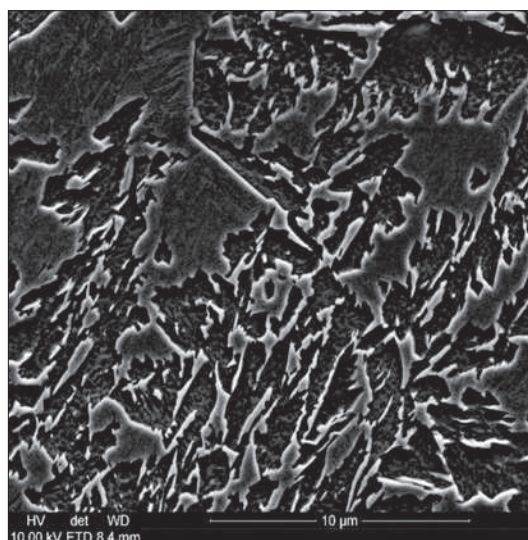


b) SEM, powiększenie 4000×

Rys. 2. Struktura stali S369 po schłodzeniu i wyżarzaniu w warunkach izotermicznych przy temperaturze 400°C/30 min.
Fig. 2. Microstructure of S369 steel after cooling and isothermal annealing at the temperature of 400°C for 30 min

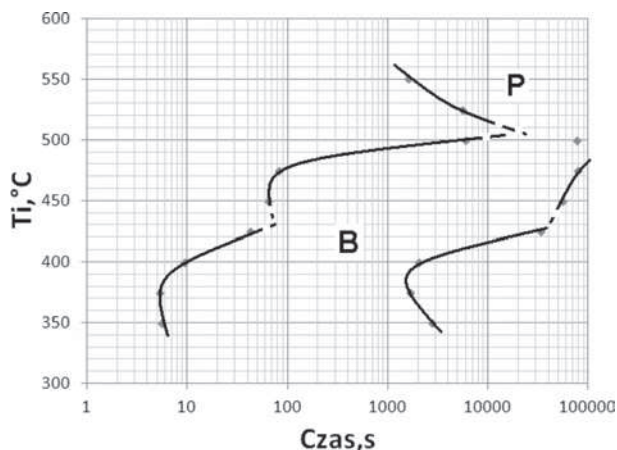


a) LOM, powiększenie 1387×



b) SEM, powiększenie 4000×

Rys. 3. Struktura stali S369 po schłodzeniu i wyżarzaniu w warunkach izotermicznych przy temperaturze 450°C/30 min.
Fig. 3. Microstructure of S369 steel after cooling and isothermal annealing at the temperature of 450°C for 30 min.



Rys. 4. Wykres CTP, doświadczalnej stali konstrukcyjnej X81 w zakresie przemiany bainitycznej

Fig. 4. TTT diagram of the experimental structural steel X81 in the range of bainitic transformation

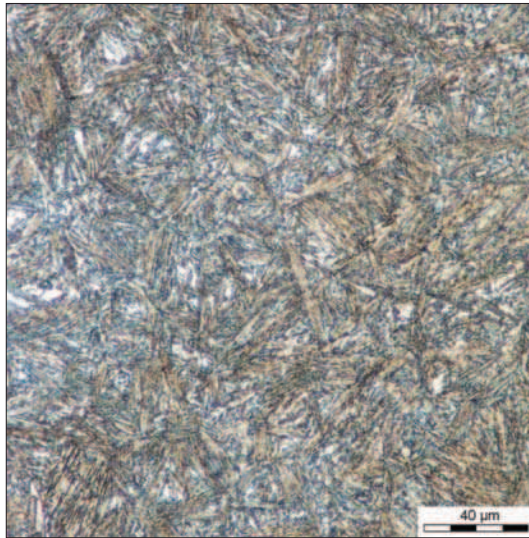
temperaturze 525°C i 550°C. Długi czas wyżarzania prowadzi do fragmentacji płytek cementytu w perlicie (Rys. 6).

W tabeli 2 zestawiono temperaturę M_s i M_f , wyznaczoną podczas chłodzenia po zakończeniu wyżarzania izotermicznego stali X81 austenitizowanej przy temperaturze 950°C w czasie 15 min. Z podwyższeniem temperatury wyżarzania izotermicznego, temperatura M_s i M_f wzrastają do momentu, gdy w strukturze zachodzi intensywnie przemiana perlityczna ($T_1 = 550^\circ\text{C}$).

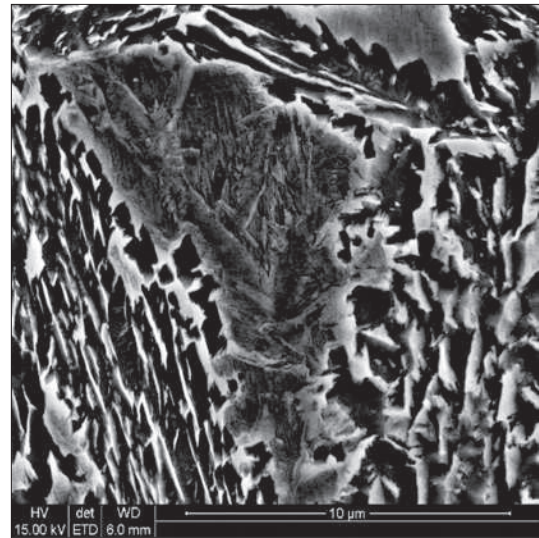
Stal X83

Przedstawiony na rys. 7 wykres pokazuje, że przemiana bainityczna stali X83 rozpoczyna się najszybciej przy temperaturze 375°C.

Badania mikrostruktury metodami mikroskopii świetlnej i elektronowej SEM (Rys. 8) wskazują, że struktura próbki schłodzonej szybko z temperatury austenitizowania 950°C (w czasie 900 s) i wytrzymanej

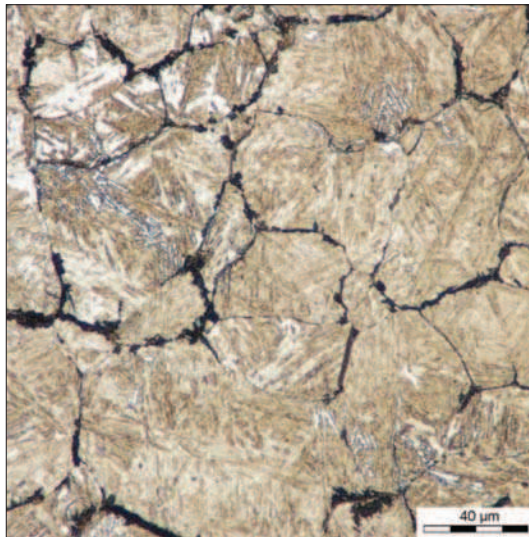


a) LOM, powiększenie 1387×

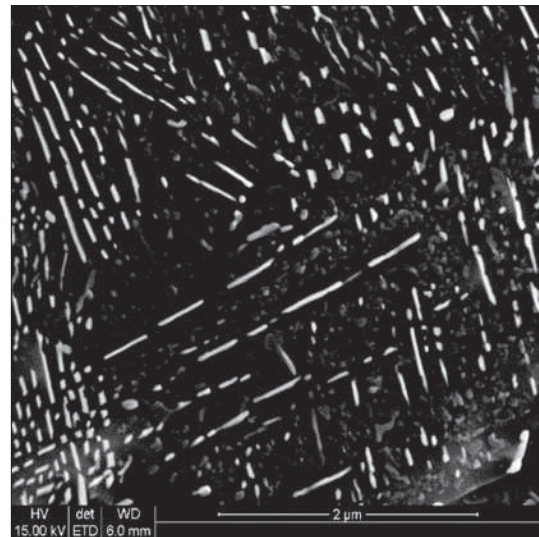


b) SEM, powiększenie 4000×

Rys. 5. Struktura stali X81 po schłodzeniu i wyżarzaniu w warunkach izotermicznych przy temperaturze 375°C/16 h
 Fig. 5. Microstructure of X81 steel after cooling and isothermal annealing at the temperature of 375°C for 16 h



a) 500°C/42 h, LOM, powiększenie 1387×

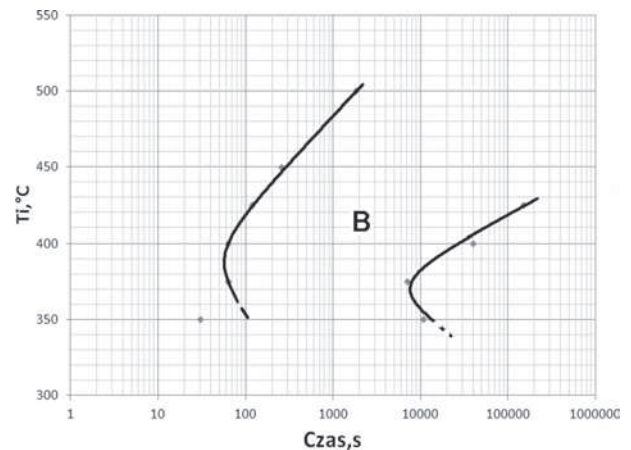


b) 550°C/24 h: SEM, powiększenie 20000×

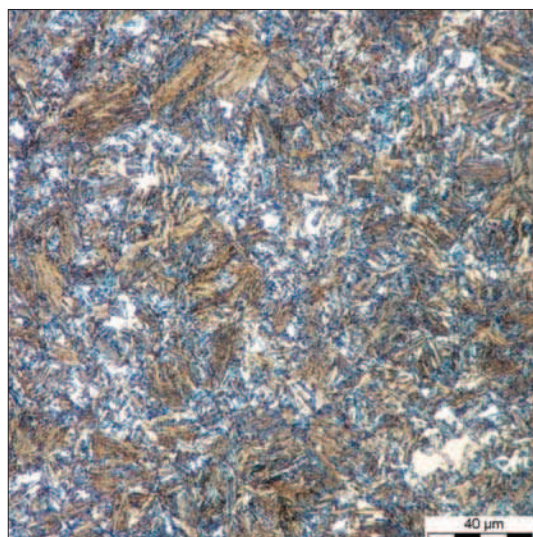
Rys. 6. Struktura stali X81 po schłodzeniu i wyżarzaniu w warunkach izotermicznych
 Fig. 6. Microstructure of X81 steel after cooling and isothermal annealing

Tabela 2. Temperatura M_s i M_f wyznaczona podczas chłodzenia po zakończeniu wyżarzania izotermicznego
 Table 2. Temperature M_s and M_f determined during cooling from isothermal annealing temperature

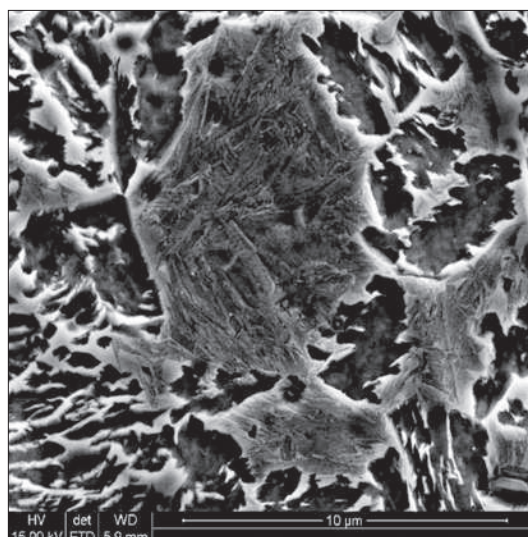
T_i [°C]	M_s [°C]	M_f [°C]	Twardość HV10
375 (16 h)	206	<RT	419
400 (16 h)	215	<RT	412
425 (16 h)	271	<RT	422
450 (16 h)	311	~58	496
475 (24 h)	346	111	507
500 (42 h)	353	Bd	167
525 (64 h)	393	211	104
550 (24 h)	359	245	95



Rys. 7. Wykres CTP; doświadczalnej bainitycznej stali konstrukcyjnej X83 w zakresie przemiany bainitycznej
 Fig. 7. TTT diagram of the experimental bainitic structural steel X83 in the range of bainitic transformation

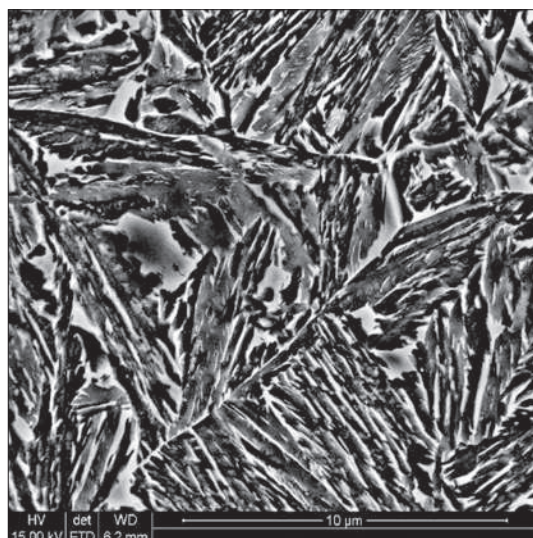


a) LOM, powiększenie 1387×

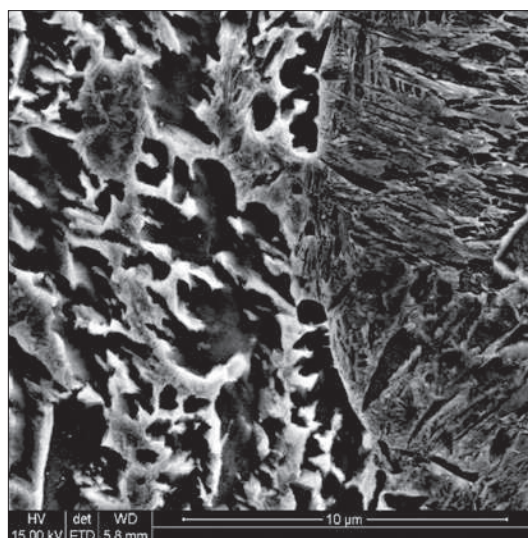


b) SEM, powiększenie 5000×

Rys. 8. Struktura stali X83 po schłodzeniu i wyżarzaniu w warunkach izotermicznych przy temperaturze 375°C/3 h
 Fig. 8. Microstructure of X83 steel after cooling and isothermal annealing at the temperature of 375°C for 3 h



a) 350°C/3h: powiększenie 5000×



b) 425°C/5h b) powiększenie 5000×

Rys. 9. Struktura stali X83 po schłodzeniu i wyżarzaniu w warunkach izotermicznych. SEM

Fig. 9. Microstructure of S369 steel after cooling and isothermal annealing at the temperature of 400°C for 30 min

izotermicznie przy temperaturze 375°C (3 h) złożona jest z bainitu (głównie górnego, miejscami dolnego) i austenitu szczątkowego. Część austenitu podczas chłodzenia przemienia się w martenzyt (Rys. 8b). Podwyższenie temperatury wytrzymania izotermicznego do 400°C i wyżej powoduje stabilizację austenitu, który podczas chłodzenia ulega przemianom w martenzyt. Ogólnie morfologia bainitu zmienia się z dolnego (Rys. 9a) – przy temperaturze $T_i = 350^\circ\text{C}$, poprzez górny (Rys. 8b) w ziarnisty (Rys. 9b).

W tabeli 3 zestawiono temperaturę M_s i M_f wyznaczoną podczas chłodzenia po zakończeniu wyżarzania izotermicznego stali X83 austenitizowanej przy temperaturze 950°C w czasie 15 min. Z podwyższeniem temperatury wyżarzania izotermicznego temperatura M_s i M_f wzrasta. Zwiększenie czasu wyżarzania izotermicznego powoduje obniżenie temperatury M_s .

Tabela 3. Temperatura M_s i M_f wyznaczona podczas chłodzenia po zakończeniu wyżarzania izotermicznego stali X83

Table 3. Temperature M_s and M_f determined during cooling from isothermal annealing temperature

T_i [°C]	Temperatura początku i końca przemian [°C]		Twardość HV10
	M_s	M_f	
500 (3 h)	337	57	570
450 (3 h)	325 318	35 55?	567 562
425 (5 h)	313	<RT	555
425 (63 h)	294	<RT	560
400 (3 h)	253	<RT	571
400 (22 h)	219	<RT	451
375 (3 h)	208	<RT	493
350 (3 h)	182	<RT	582

3.2. WYNIKI BADAŃ TRYBOLOGICZNYCH

Wyniki badań trybologicznych stali X83 w porównaniu do konwencjonalnej stali szynowej zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki badań trybologicznych stali X83 i 900A
Table 4. Results of tribological tests of X83 and 900A steels

Lp.	Oznaczenie próbki	Ubytek masy próbki [g]	Intensywność zużycia [g/m]·10 ⁻³
1.	900A	0,0279	13,9
2.	X83	0,0181	9

Doświadczalna stal bainityczna na szyny X83 wykazała się lepszą odpornością na ścieranie. Ubytek masy i intensywność ścierania były około półtora raza mniejsze w porównaniu do konwencjonalnej (perlitycznej) stali szynowej 900A.

3.3. WYNIKI BADAŃ PODATNOŚCI STALI BAINITYCZNYCH DO SPAJANIA

Zakres badań parametrów charakteryzujących wybrane stale AHSS w wysokiej temperaturze obejmował wyznaczenie następujących parametrów: NST, NDT, DRT i BTR.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń temperatura NST stali S369 wynosi 1410±10°C, a dla stali X83 1398±30°C.

Znajomość temperatury NST i NDT pozwala określić skłonność stali do pęknięcia. Przyjmuje się, że przy spełnieniu warunku $NST - NDT < 20^\circ\text{C}$ pęknięcia w stalach, w zasadzie nie występują. Dla stali S369 warunek ten jest spełniony ponieważ temperatura NDT wynosi 1405°C, a zatem $NST - NDT < 20$. W przypadku stali X83 NDT jest bliskie 1355°C stąd $NST - NDT > 20$ i stal ta może mieć skłonność do pęknięcia podczas spawania czy odlewania ciągłego.

DRT stali S369 wynosi ok. 1402°C, natomiast dla stali X83 jej wartość mieści się w granicach 1346°C-1450°C (wartość interpolowana 1349°C).

Na podstawie znajomości temperatury NST i DRT można określić zakres temperatury kruchości BTR ($BTR = NST - DRT$). Zakres BTR dla stali S369 jest bardzo wąski i wynosi 8°C, tzn., że stal ta nie powinna sprawiać kłopotów w procesach ciągłego odlewania lub spawania. Zakres BTR stali X83 wynosi ok. 49°C, zatem stal ta ma większość skłonność do tworzenia pęknięć.

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Osiągnięcie zamierzonego celu pracy, tj. opracowanie izotermicznych wykresów przemian fazowych w bainitycznych stalach AHSS było możliwe po przeprowadzeniu badań dylatometrycznych oraz metalograficznych. Zakres temperatury badania zawężono do przedziału temperatury odpowiadającego przemianie bainitycznej, bazując na wykresach CTP_c badanych stali.

Analiza opracowanych wykresów CTP_i wskazuje, że w stali S369 minimalna trwałość austenitu występuje przy temperaturze 400°C (Rys. 1), ponieważ przemiana bainityczna rozpoczyna się najszybciej. Obrazy mikrostruktury zarejestrowane metodami mikroskopii świetlnej i elektronowej (Rys. 2) wskazują, że struktura próbki wytrzymanej izotermicznie przy temperaturze 400°C (30 min.) złożona jest z bainitu (głównie górnego) i austenitu szczątkowego.

W przypadku stali X81 przemiana bainityczna rozpoczyna się najszybciej przy temperaturze 375°C (Rys. 4). Obrazy mikrostruktury zarejestrowane metodami mikroskopii świetlnej i elektronowej (Rys. 5 i 6) pokazują, że struktura próbki schłodzonej szybko z temperatury austenitowania 950°C (w czasie 900 s) i wytrzymanej izotermicznie przy temperaturze 375°C (16h) złożona jest z bainitu (głównie górnego, miejscami dolnego) i austenitu szczątkowego.

Stal X83 ma najbogatszy skład chemiczny ze wszystkich badanych w niniejszej pracy (Tab. 1).

Przedstawiony na rys. 7 wykres CTP_i pokazuje, że przemiana bainityczna rozpoczyna się najszybciej przy temperaturze 375°C. Wynik dla temperatury 350°C (Rys. 1) jest niepoprawny ponieważ uzyskana w tym doświadczeniu szybkość chłodzenia była niedostateczna i przemiana bainityczna rozpoczęła się, przed osiągnięciem zadanej temperatury wyżarzania izotermicznego. Badania mikrostruktury metodami mikroskopii świetlnej i elektronowej (Rys. 8 i 9) wskazują, że struktura próbki stali X83 wytrzymanej izotermicznie przy temperaturze 375°C (3 h) złożona jest z bainitu (głównie górnego, miejscami dolnego) i austenitu szczątkowego (Rys. 8). Część austenitu podczas chłodzenia przemienia się w martenzyt (Rys. 9b).

Zmiany mikrostruktury badanych stali spowodowane podwyższeniem temperatury wyżarzania izotermicznego są zbliżone. Zwykle następuje stabilizacja austenitu, który podczas chłodzenia ulega przemianie w martenzyt (S369 – Rys. 2 i 3; X81 – Rys. 5 i 6; X83 – Rys. 8 i 9).

Morfologia bainitu wraz ze wzrostem temperatury wyżarzania izotermicznego zmienia się z dolnego (X83-rys.3.9a); poprzez górny (S369 – Rys. 2 i 3; X81 – Rys. 5 i 6; X83 – Rys. 8) w ziarnisty (X-83 – Rys. 9b).

Dalsze podwyższenie temperatury wyżarzania izotermicznego stali X81 do 500°C (Rys. 6) prowadzi do pojawienia się produktów przemiany perlitycznej, głównie po granicach ziarn byłego austenitu. Udział bainitu (ziarnistego) jest niewielki, a w strukturze przeważa martenzyt powstały podczas chłodzenia do temperatury otoczenia. Udział perlitu staje się dominujący po wyżarzaniu przy temperaturze 525°C i 550°C. Długi czas wyżarzania prowadzi do fragmentacji płytek cementytu w perlicie (Rys. 6b).

Analiza wyników badań dylatometrycznych temperatury M_s i M_f wykazała, że z podwyższeniem temperatury wyżarzania izotermicznego temperatury te wzrastają (Tab. 2 i 3) do momentu, gdy w strukturze zachodzi intensywnie przemiana perlityczna ($T_i = 550^\circ\text{C}$, Tab. 2). Zjawisko to związane jest z udziałem austenitu, który wzrasta z podwyższeniem temperatury wyżarzania, przy tym jednocześnie średnie stężenie węgla w austenicie maleje, a to z kolei powoduje, że podczas chłodzenia temperatura początku przemiany martenzytycznej rośnie. Zwiększenie czasu wyżarzania izotermicznego powoduje obniżenie temperatury M_s (Tab. 3).

Przeprowadzone na próbkach dylatometrycznych pomiary twardości, po wyżarzaniu izotermicznym wskazują, że w przypadku stali X81 i X83 z podwyższeniem temperatury wyżarzania izotermicznego twardość stali wzrasta, o ile w strukturze nie pojawi się perlit (X81). Najprawdopodobniej związane jest to ze zwiększeniem udziału martenzytu powstałego podczas chłodzenia do temperatury otoczenia.

Stal X83 w porównaniu do konwencjonalnej stali szynowej 900A (stal perlityczna) wykazała we wstępnych badaniach trybologicznych ok. 1,5-rza mniejszą podatność na ścieranie (Tab. 4). Ponieważ przebieg obróbki cieplnej prętów, z których wykonano próbki do badań trybologicznych był monitorowany, dlatego została ona zasymulowana za pomocą dylatometru. Analiza dylatogramów oraz badania mikrostruktury pokazały, że struktura próbek stali X83 po symulowanej obróbce cieplnej stanowi konglomerat bainitu (kilku rodzajów), martenzytu i austenitu nieprzemienionego i/lub MA.

Nowoczesne szyny łączone są metodą spawania, dlatego w pracy przeprowadzono wstępne badania podatności do spajania wybranych stali (S369 i X83). Określono parametry wysokotemperaturowe stali, takie jak temperaturę NST, NDT, DRT oraz zakres kruchości BTR.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń wyznaczono temperaturę NST, która dla stali S369 wynosi $1410 \pm 10^\circ\text{C}$, a dla stali X83 $1398 \pm 30^\circ\text{C}$.

Znajomość NST i NDT pozwala określić skłonność stali do pęknięcia. Przyjmuje się, że przy spełnieniu warunku $NST - NDT < 20^\circ\text{C}$ pęknięcia w stalach, w zasadzie nie występują. Dla stali S369 warunek ten jest spełniony ponieważ temperatura NDT wynosi 1405°C , a zatem $NST - NDT < 20$.

W przypadku stali X83 temperatura NDT jest bliska 1355°C stąd $NST - NDT > 20$ i stal ta może mieć skłonność do pęknięcia podczas spawania lub ciągłego odlewania.

Wyznaczona temperatura odzysku plastyczności DRT stali S369 wynosi ok. 1402°C , natomiast dla stali X83 jej wartość interpolowana sięga 1349°C . Na podstawie znajomości temperatury NST i DRT wyznaczono zakres temperatury kruchości BTR, który dla stali S369 jest bardzo wąski i wynosi 8°C , tzn., że stal ta nie powinna sprawiać kłopotów w procesach ciągłego odlewania lub spawania. Zakres BTR stali X83 wynosi ok. 49°C , zatem stal ta ma większą skłonność do tworzenia pęknięć.

5. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań opracowano wykresy przemiany bainitycznej w warunkach izoter-

micznych dla wybranych stali AHSS. Porównano odporność na ścieranie doświadczalnej stali bainitycznej oraz konwencjonalnej stali szynowej. Wykonano wstępne badania parametrów charakteryzujących podatność wybranych stali AHSS do spajania.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że:

1. Ze wzrostem temperatury wyżarzania izotermicznego morfologia bainitu zmienia się płynnie (występują fazy przejściowe) z dolnego poprzez górny w ziarnisty.
2. Podwyższenie temperatury wyżarzania izotermicznego prowadzi do stabilizacji austenitu (co przejawia się zwiększeniem jego udziału), który podczas chłodzenia przemienia się w martenzyt.
3. Zwiększenie udziału austenitu, czemu towarzyszy zmniejszenie stężenia węgla w austenicie prowadzi do podwyższenia temperatury M_s i M_f badanych stali.
4. Zwiększenie czasu wyżarzania izotermicznego powoduje obniżenie temperatury M_s .
5. Zwiększenie udziału martenzytu wiąże się z podwyższeniem twardości stali, o ile w strukturze nie pojawi się perlit.
6. Stal X83 w porównaniu do konwencjonalnej stali szynowej 900A (stal perlityczna) wykazała we wstępnych badaniach trybologicznych ok. półtora raza mniejszą podatność na ścieranie.
7. Wyznaczona temperatura NST stali S369 wynosi $1410 \pm 10^\circ\text{C}$, a stali X83 $1398 \pm 30^\circ\text{C}$.
8. Temperatura NDT dla stali S369 wynosi 1405°C , a stali X83 NDT jest bliska 1355°C .
9. W przypadku stali S369 temperatura DRT wynosi ok. 1402°C , natomiast dla stali X83 jej wartość interpolowana sięga 1349°C .
10. Zakres temperatury kruchości BTR dla stali S369 jest bardzo wąski i wynosi 8°C , tzn., że stal ta nie powinna sprawiać kłopotów w procesach ciągłego odlewania lub spawania, natomiast BTR stali X83 wynosi ok. 49°C , zatem stal ta ma większą skłonność do tworzenia pęknięć.

Artykuł zawiera wyniki badań uzyskane w pracy S0-0893 finansowanej z dotacji na działalność statutową w roku 2015.

LITERATURA

1. Zalecki W., Kuziak R., Pietrzyk M., Rauch Ł.: Matematyczne modelowanie i analiza przemian fazowych zachodzących w strukturze stali bainitycznych podczas chłodzenia, po walcowaniu na gorąco. Część II. Prace IMŻ 2010, t. 62, nr 3, s. 34–37
2. Zalecki W., Molenda R., Pietrzyk M.: Numeryczny model przemian fazowych zachodzących w stali konstrukcyjnej wielofazowej. II Otwarte Seminarium Naukowe. Symulacja numeryczna i fizyczna w rozwoju wyrobów i technologii przemysłu stalowego. Ustroń 19-20.04.2012. Prace IMŻ 2012, t. 64, nr 1, s. 35–40
3. Kuziak R., Zalecki W., Pietrzyk M.: Matematyczne modelowanie hartowności bainitycznej. Prace IMŻ 2010, t. 62, nr 1, s. 27–32
4. Zalecki W., Kuziak R. i in.: Ilościowy opis synergicznego wpływu składników stopowych w nowoczesnych stalach bainitycznych utwardzanych wydzieleniowo, Sprawozdanie IMŻ nr S0-0753, grudzień 2010. Praca niepublikowana
5. GLEEBLE SYSTEMS AND APPLICATIONS Digital Control Gleeble Systems Training School, December 1998, Dynamic Systems for Materials Research
6. Kuziak R., Zalecki W., Łapczyński Z.: Sprawozdanie IMŻ nr S-00311/1/BM. Praca niepublikowana
7. Kuziak R., Zalecki W., Łapczyński Z.: Sprawozdanie IMŻ nr S-00311/2/BM. Praca niepublikowana
8. Kuziak R., Zalecki W., Łapczyński Z.: Sprawozdanie IMŻ nr S-00311/3/BM. Praca niepublikowana
9. Kuziak R., Zalecki W., Łapczyński Z.: Sprawozdanie IMŻ nr S-00312/2/BM. Praca niepublikowana