

Artur ŻAK, Bogdan ZDONEK, Mariusz ADAMCZYK, Ireneusz SZYPUŁA

Instytut Metalurgii Żelaza

Włodzimierz KUTERA, Krzysztof KOSTRZEWA

PIOMA-ODLEWNIA Sp.z o.o.

TECHNOLOGIA PRODUKCJI WIELKOGABARYTOWYCH ODLEWÓW STALIWNYCH PRZEZNACZONYCH DO ZASTOSOWAŃ W EKSTREMALNYCH WARUNKACH EKSPLOATACJI

Rosnący popyt na odlewy staliwne przeznaczone do zastosowań w temperaturach do minus 40°C skłonił Odlewnię Pioma Sp. z o.o. do podjęcia próby produkcji takich odlewów w oparciu o niskonakładową modyfikację technologii wytapiania, odlewania oraz obróbki cieplnej odlewów. W pracy na podstawie wyników badań odlewów wytwarzanych ze staliwa w gatunku G18NiMoCr3-6 według stosowanej obecnie technologii, opracowano wytyczne do modyfikacji technologii w zakresie zmiany składu chemicznego staliwa, sposobu wytapiania staliwa i obróbki cieplnej odlewów. Główne zmiany obejmowały wyeliminowanie ze składu staliwa dodatku tytanu oraz podwyższenie zawartości węgla i pierwiastków stopowych, zmianę sposobu odtleniania staliwa, wprowadzenie modyfikacji wtrąceń niemetalicznych za pomocą drutu rdzeniowego Ca-Si oraz zmieniono wybrane parametry obróbki cieplnej odlewów. Wykonana seria doświadczalnych wytopów staliwa w oparciu o zmodyfikowaną technologię wykazała, że w obecnych warunkach technicznych Odlewni możliwe jest spełnienie wymagań odbiorców, co do właściwości mechanicznych odlewów o grubości do 75 mm, w szczególności udarności równej co najmniej 42 J, dla próbki KV, w temperaturze minus 40°C. W celu spełnienia wymagań odbiorców dla odlewów o większych przekrojach, w oparciu o uzyskane wyniki badań czystości staliwa i właściwości mechanicznych opracowano zalecenia do innowacyjnej technologii rafinacji pozapiecowej ciekłego staliwa.

Słowa kluczowe: odlew, właściwości mechaniczne, porowatość, wtrącenia niemetaliczne

TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING LARGE-SIZE STEEL CASTINGS FOR APPLICATIONS UNDER EXTREME OPERATING CONDITIONS

The growing demand for steel castings intended for applications at up to minus 40°C induced the Odlewnia Pioma Sp. z o.o. foundry to make an attempt to manufacture such castings based on a low-cost modification of technology for melting, casting and heat treatment of castings. In this paper, the guidelines for technology modifications with regard to the change in cast steel chemical composition, cast steel melting method and heat treatment of castings were developed based on results of investigations for castings manufactured from G18NiMoCr3-6 cast steel in accordance with the current technology. The main changes included the elimination of titanium additive from the cast steel composition and increase in the contents of carbon and alloying elements, a change in the cast steel deoxidation method, introduction of modifications to non-metallic inclusions by means of Ca-Si flux-cored wire, and selected casting heat treatment parameters were changed. The series of experimental cast steel melts manufactured using the modified technology have revealed that it is possible to meet the buyers' requirements for mechanical properties of castings with thickness of up to 75 mm, in particular impact strength of at least 42 J, for KV sample at minus 40°C under the present technical conditions of the Foundry. To meet the buyers' requirements for castings with higher cross-sections, the recommendations on innovative technology for secondary refining of liquid cast steel were developed based on obtained results of investigations of cast steel purity and mechanical properties.

Key words: cast, mechanical properties, porosity, non-metallic inclusion

1. WPROWADZENIE

Obecnie przemysł wydobywczy koncentruje swoją uwagę na możliwości pozyskania ropy i gazu w rejonie koła podbiegunowego oraz na głębokościach poniżej 3000 m. Oznacza to, że wyroby stalowe stosowane

w urządzeniach wydobywczych muszą być przystosowane do eksploatacji w ekstremalnych warunkach temperatury i ciśnienia.

Jednym z odlewów produkowanych w Pioma-Odlewnia Sp. z o.o. jest główny element w systemach wiertniczych montowanych na platformach pływających.

Ze względu na warunki eksploatacji, wymagania co do bezpieczeństwa pracy personelu oraz potencjalne bardzo duże straty spowodowane ewentualną awarią, odlewy te zaliczane są do klasy A, tj. najwyższej klasy odlewów pod względem wymagań jakościowych. Odbiorcami odlewów są uznane na światowym rynku firmy produkujące urządzenia wydobywcze. Zgodnie z wymaganiami klienta [1] odlewy ze staliwa w gatunku G18NiMoCr3-6 stosowane w urządzeniach wydobywczych powinny charakteryzować się zespołem następujących właściwości mechanicznych: R_e min. 860 MPa, R_m min. 930 MPa, A_4 min. 14 %, KV2 w temperaturze -40°C , min. 42 J.

Właściwości eksploatacyjne odlewu są zdeterminowane zarówno przez kolejne etapy procesu wytwarzania staliwa i wykonania odlewu, jak i skład chemiczny staliwa oraz sposób ich obróbki cieplnej. Analiza wymagań stawianych odlewem przez producentów konstrukcji i urządzeń stosowanych w przemyśle wydobywczym ropy i gazu wykazała, że odlewy stalowe muszą charakteryzować się poziomem właściwości mechanicznych – wytrzymałością, plastycznością i odpornością na pękanie – zbliżonym do poziomu właściwości uzyskiwanych w wyrobach stalowych po przeróbce plastycznej.

2. CEL, ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Celem badań było opracowanie dla warunków technicznych Pioma-Odlewnia Sp. z o.o. technologii wytapiania staliwa i obróbki cieplnej odlewów w klasie A ze staliw stopowych, które zapewniają uzyskanie odlewu o właściwościach zgodnych z wymaganiami zawartymi w specyfikacji odbiorowej klienta. Jednocześnie podjęto próbę modyfikacji składu chemicznego staliwa G18NiMoCr3-6 w zakresie dopuszczalnych zawartości pierwiastków stopowych ujętych wyżej wymienionej specyfikacji. Wymagania odnośnie do składu chemicznego staliwa oraz właściwości mechanicznych odlewów przedstawione ze strony odbiorców zamieszczono odpowiednio w tabelach 1 i 2.

Zakres wykonanych prac obejmował opracowanie zmodyfikowanego składu chemicznego staliwa, technologii wytapiania pozwalającej na zwiększenie jego czystości, technologii obróbki cieplnej odlewów oraz badania odlewów w zakresie oceny właściwości mechanicznych, makrostruktury, mikrostruktury oraz wtrąceń niemetalicznych w odlewach z wytopów doświadczalnych.

Badania właściwości mechanicznych odlewów prowadzono w próbkach pobranych ze środkowego obszaru dodatkowych odlewów, tzw. kilbloków odlewanych jednocześnie z właściwym odlewem. Kilbloki są odlewami o zróżnicowanych wielkościach, które pozwalają na ocenę właściwości mechanicznych i struktury odlewu właściwego bez konieczności jego niszczenia. Kształt i wymiary kilbloków są dobierane w sposób pozwalający na zachowanie podobieństwa procesów krzepnięcia zachodzących w kilbloku i odlewie. Kilbloki odlewane są w postaci wiązek o kształcie i wymiarach przedstawionych na rysunku 1.

Próbki do badania właściwości mechanicznych odlewów pobierane są z obszaru środkowego kilbloków o średnicy A (Rys. 1). Badania właściwości mechanicznych wykonano na próbkach okrągłych o średnicy pomiarowej 10 mm. Próbę rozciągania przeprowadzono z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick Z250. Udarność badano na próbkach o wymiarach 10 mm x 10 mm x 55 mm z karbem V w temperaturze -40°C . Badania przeprowadzono z wykorzystaniem młota Zwick/Roell RKP450. Makrostrukturę kilbloków oceniano na tarczach poprzecznych wyciętych w odległości około 50 mm od brzegu po trawieniu w wodnym 50% roztworze kwasu solnego w temperaturze otoczenia. Obserwacje mikrostruktury oraz ilościową analizę wtrąceń niemetalicznych przeprowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego Nikon Epiphot 200 z systemem analizy obrazu LUCIA G v.5.03. Analizę składu chemicznego wtrąceń niemetalicznych wykonano z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego Inspect F.

Tabela 1. Składy chemiczne staliwa do odlewania adapterów według wymagań odbiorców, % masowe

Table 1. Chemical compositions of cast steel for casting adapters in accordance with buyers' requirements, wt%

Odbiorca		Udział pierwiastków w staliwie, % mas.										
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al _{cal}
Klient 1	min	0,15	0,80	0,35	-	-	0,60	1,50	0,35	-	0,04	0,015
	max	0,20	1,00	0,50	0,015	0,005	0,90	2,00	0,45	0,20	0,12	0,030
Klient 2	min	0,13	0,60	0,20	-	-	0,55	1,50	0,35	-	0,03	0,015
	max	0,20	1,00	0,60	0,015	0,005	1,00	2,00	0,55	0,20	0,06	0,030

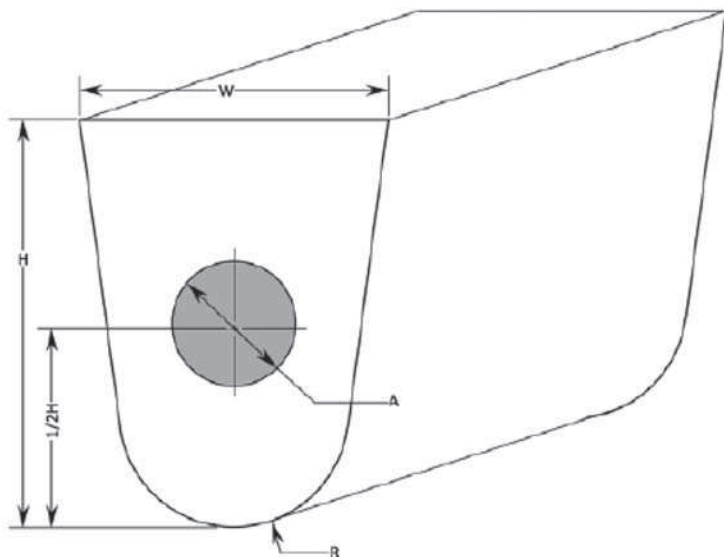
Tabela 2. Właściwości mechaniczne odlewów adapterów według wymagań odbiorców

Table 2. Mechanical properties of adapter castings in accordance with buyers' requirements, wt%

Odbiorca		R_e , MPa	R_m , MPa	A_4 , %	A_5 , %	Z, %	KV2 (-40°C), J	Twardość, HB
Klient 1	min	861	930	14	12	30	42	277
	max	-	-	-	-	-	-	332
Klient 2	min	862	931	14	14	45	42	
	max	1*	1103	-	-	-	-	341

1* – $R_e/R_m = 0,93$

Pręt równoważny		W		H		1/2H		R		Średnica A	
cale	mm	cale	mm	cale	mm	cale	mm	cale	mm	cale	mm
Kilbłok 1	25,4	1,1	27,6	1,5	38,7	0,8	19,3	0,4	11,0	0,5	12,1
Kilbłok 2	50,8	2,2	55,2	3,0	77,3	1,5	38,7	0,9	22,1	1,0	24,3
Kilbłok 3	76,2	3,3	82,8	4,6	116,0	2,3	58,0	1,3	33,1	1,4	36,4
Kilbłok 4	101,6	4,3	110,4	6,1	154,6	3,0	77,3	1,7	44,2	1,9	48,6
Kilbłok 5	127,0	5,4	138,0	7,6	193,3	3,8	96,6	2,2	55,2	2,4	60,7



Rys. 1. Kształt i wymiary kilbłoków oraz położenie i wymiary obszaru w kilbłokach, z którego pobierane są próbki do badania właściwości mechanicznych odlewów [1]

Fig. 1. Shape and dimensions of keel blocks as well as location and dimensions of the area within keel blocks the samples for mechanical testing of castings are taken from [1]

3. PROCES TECHNOLOGICZNY WYTWARZANIA ODLEWÓW W PIOMA-ODLEWNIA SP. Z O.O.

Proces wytapiania staliwa prowadzony jest w piecach łukowych o pojemności 3 i 6 ton. Wytapianie staliwa prowadzi się w procesie dwuzłożowym. Po roztopieniu wsadu i wyświeżeniu kąpielii tlenem gazowym, ściągą się żużel i naprowadza nowy do odtleniania, odsiarczania i rafinacji staliwa z wtrąceniem niemetalicznych. Staliwo odlewa się do kadzi zatyczkowych z szamotowym wyłożeniem ogniotrwałym. Staliwo w kadzi po odlaniu poddaje się krótkotrwałemu argonowaniu w celu ujednorodnienia składu chemicznego i temperatury kąpielii. Po argonowaniu staliwo odlewane jest do wysuszonych form piaskowych utwardzonych żywicą formaldehydową.

Obróbka cieplna odlewów obejmuje operacje wyżarzania zupełnego w temperaturze 950°C, normalizowania w temperaturze 920°C i hartowania w wodzie po austenitzowaniu w 920°C. Po hartowaniu odlewy podaje się odpuszczaniu w temperaturze 620°C. Bada-

nia właściwości mechanicznych odlewów adapterów ze staliwa G18NiMoCr3-6 z mikrodotadkiem tytanu wykonane w Pioma-Odlewnia wykazały, że wytwarzane z zastosowaniem opisaną technologią odlewy nie spełniają wymagań odnośnie do udarności w temperaturze -40°C.

4. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I STRUKTURA ODLEWÓW ODLEWANYCH WEDŁUG DOTYCHCZAS STOSOWANEJ TECHNOLOGII

W celu określenia elementów technologii wpływających negatywnie na ciągliwość odlewów w obniżonej temperaturze przeprowadzono nadzorowany wytop o numerze 1 z zastosowaniem dotychczas stosowanej technologii. Skład chemiczny staliwa oraz właściwości mechaniczne odlewów wyprodukowanych z zastosowaniem dotychczasowej technologii z wytopu nadzorowanego przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Skład chemiczny staliwa wytworzonego z zastosowaniem dotychczas stosowanej technologii odlewania

Table 3. Chemical composition of cast steel manufactured using the current casting technology

Nr wytopu	Zawartości pierwiastków, % mas.											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Al _{cat}
1	0,17	0,88	0,48	0,007	0,006	0,68	1,68	0,38	0,09	0,066	0,03	0,038

Tabela 4. Właściwości mechaniczne odlewów wykonanych według dotychczas stosowanej technologii

Table 4. Mechanical properties of castings made in accordance with the current technology

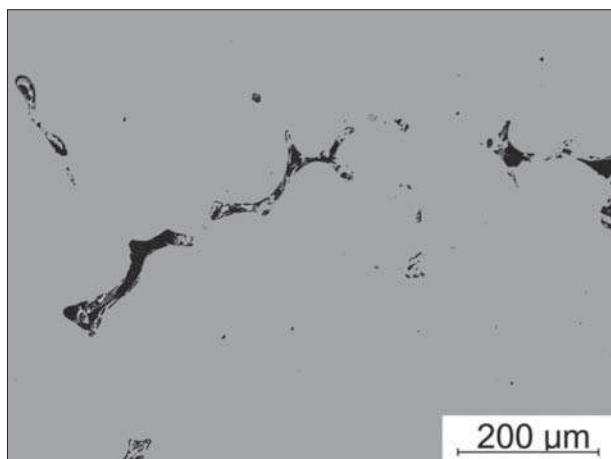
Lp.	Numer wytopu	Numer kilbłoku	R _e , MPa	R _m , MPa	A ₄ , %	KV2 (-40), J
1	1	1	915	986	17,5	śr. = 13 (13,14,13)
2		5	938	927	9,5	śr. = 26 (30,32,16)

Tabela 5. Zawartości gazów w staliwie wytworzonym z zastosowaniem dotychczas stosowanej technologii odlewania

Table 5. Gas contents in cast steel manufactured using the current casting technology

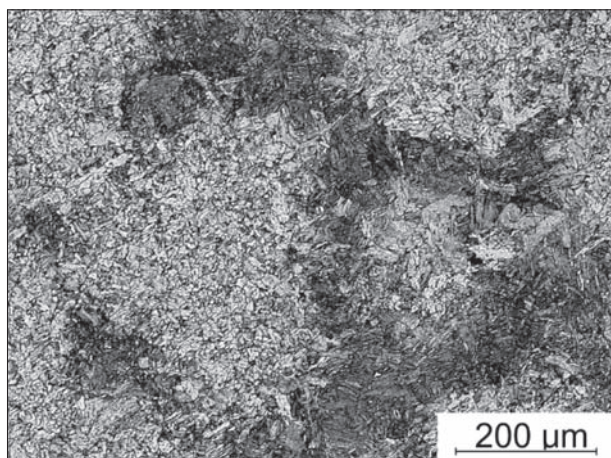
Nr wytopu	O _{cał.} , ppm	N, ppm
1	106	84

W przypadku odlewów z wytopu nadzorowanego (wytop 1) w żadnym z kilbłoków nie uzyskano wymaganego poziomu udarności w temperaturze -40°C . Ponadto kilbłoki nr 5 charakteryzują się niską plastycznością, wartość wydłużenia A_4 jest równa 9,5%. Analiza struktury odlewów i wtrąceń niemetalicznych wykazała, że główną przyczyną nie uzyskania pożądanych wartości udarności i plastyczności jest wysoki stopień zanieczyszczenia staliwa niezmodyfikowanymi wtrąceniami niemetalicznymi, występowanie drobnych pustek środkowych (Rys. 2), wydzielenia azotków tytanu (Rys. 3) oraz obecność mieszanej struktury złożonej z bainitu górnego i martenzytu (Rys. 3). Staliwo z wytopu 1 charakteryzuje się wysoką zawartością tlenu całkowitego równą 106 ppm (Tab. 5), co przekłada się na duży udział wtrąceń niemetalicznych. Sumaryczny udział powierzchniowy wtrąceń niemetalicznych jest równy 0,50%, w tym udział azotków wynosi 0,19%, a udział



Rys. 2. Pustki środkowe i azotki tytanu w środku kilbłoku nr 5 z wytopu 1

Fig. 2. Central voids and titanium nitrides inside keel block no. 5 from melt no. 1



Rys. 3. Mikrostruktura i wydzielenia azotków tytanu w środku kilbłoku nr 5 z wytopu 1

Fig. 3. Microstructure and precipitations of titanium nitrides inside keel block no. 5 from melt no. 1

siarczków i tlenków jest równy 0,31%. Udział powierzchniowy pustek jest równy 1,1%. W staliwie występują niezmodyfikowane wtrącenia Al_2O_3 oraz znaczna ilość dużych cząstek azotków tytanu. Obserwowany nierównomierny rozkład składników strukturalnych jest wynikiem mikrosegregacji pierwiastków stopowych wytworzonej w czasie krzepnięcia odlewu i nie usuniętej w czasie zabiegów obróbki cieplnej.

5. MODYFIKACJA TECHNOLOGII WYTAPIANIA STALIWA I OBRÓBKII CIEPLNEJ ODLEWÓW

Na podstawie wyników badań odlewów z wytopu 1 zdecydowano o wprowadzeniu zmian do dotychczasowej technologii wytwarzania odlewów zarówno w zakresie modyfikacji składu chemicznego staliwa jak i procesu wytapiania oraz obróbki cieplnej odlewów. Wprowadzone zmiany obejmowały:

- w obszarze składu chemicznego: podwyższenie zawartości węgla, podwyższenie zawartości chromu, molibdenu i niklu, zmniejszenie zawartości tlenu całkowitego w staliwie do jak najmniejszych zawartości (docelowo poniżej 25 ppm), ograniczenie zawartości azotu w staliwie do 80 ppm,
- w obszarze technologii wytapiania staliwa: zastosowanie wysokoglinkowego wyłożenia ogniotrwałego (andaluzytowego) kadzi oraz modyfikację wtrąceń Al_2O_3 za pomocą obróbki ciekłego staliwa drutem zawierającym CaSi,
- w obszarze obróbki cieplnej: zastąpienie wyżarzania zupełnego operacją normalizowania w temperaturze 920°C z chłodzeniem w spokojnym powietrzu, hartowanie w wodzie po austenitowaniu w temperaturze 950°C z zastosowaniem intensywnego mieszania kąpieli chłodzącej, odpuszczanie w temperaturze 620°C , z chłodzeniem w wodzie po odpuszczaniu.

6. WYTOPY DOŚWIADCZALNE Z ZASTOSOWANIEM ZMODYFIKOWANEJ TECHNOLOGII

W oparciu o wytyczne zmodyfikowanej technologii wytapiania staliwa i obróbki cieplnej odlewów, opisa-

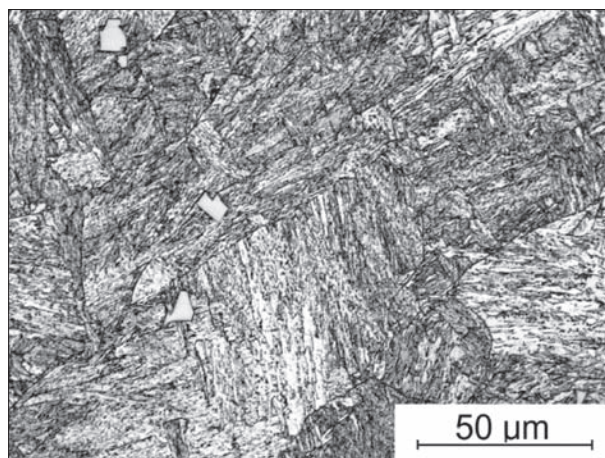


Tabela 6. Skład chemiczny staliwa wytworzonego z zastosowaniem zmodyfikowanej technologii odlewania, analiza wytopowa, % masowe**Table 6. Chemical composition of cast steel manufactured using the modified casting technology, ladle chemical analysis, wt%**

Nr wytopu	Zawartość pierwiastków, % mas.											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Al _{cal}
2	0,20	0,89	0,38	0,007	0,004	0,90	1,74	0,46	0,10	0,057	-	0,018
3	0,22	0,89	0,27	0,010	0,003	0,90	1,73	0,51	0,12	0,059	<0,01	0,024

ne szczegółowo w pracach [2, 3] wykonano dwa wytopy staliwa oznaczone numerami 2 i 3. Składy chemiczne staliwa o zmodyfikowanym składzie chemicznym przedstawiono w tabeli 6. W tabeli 7 zamieszczono zawartości gazów występujących w wytopach doświadczalnych. Wytopy doświadczalne wykonano w piecu łukowym o pojemności 3 t. Po roztopieniu wsadu, wyświeżeniu, odtlenieniu wstępnym za pomocą Al oraz rafinacji pod dwoma żużlami i korekcie składu chemicznego, staliwo spuszczało bez żużła piecowego do kadzi z wysokoglinkowym wyłożeniem ogniowca, z umieszczoną na dnie mieszanką żużła syntetycznego. Po spuszczeniu staliwa do kadzi przeprowadzano obróbkę staliwa drutem wapniowym z bezpośrednim argonowaniem. Odlewy i kilbloki po oczyszczeniu poddano zmodyfikowanej obróbce cieplnej.

Tabela 7. Zawartości gazów w staliwie wytworzonym z zastosowaniem zmodyfikowanej technologii odlewania**Table 7. Gas contents in cast steel manufactured using the modified casting technology**

Nr wytopu	O _{cał} , ppm	N, ppm
2	62	76
3	77	90

7. WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI ODLEWÓW Z WYTOPÓW DOŚWIADCZALNYCH

Wyniki badań właściwości mechanicznych odlewów z wytopów doświadczalnych o numerach 2 i 3 wyprodukowanych z zastosowaniem zmodyfikowanej technologii zamieszczono odpowiednio w tabelach 8 i 9.

Tabela 8. Właściwości mechaniczne odlewów z wytopu 2**Table 8. Mechanical properties of castings from melt no. 2**

Lp.	Numer kilbloku	Miejsce badania	R _e MPa	R _m MPa	A ₄ %	Z %	Średnia udarność. KV2 (-40°C) J	Twardość, HBW5/750
1	Kilbłok 1	IMŻ	921	995	19,2	53,0	57	-
2		Pioma Odlewnia	929	1006	15,1	56,4	38	319
3	Kilbłok 2	IMŻ	920	988	21,0	50,5	54	-
4		IMŻ	929	998	16,0	40,7	63	-
5		Pioma Odlewnia	946	1019	A ₅ =16,3	48,2	59	326
6	Kilbłok 3	IMŻ	849	886	4,7	6,9	45	-
7		Pioma Odlewnia	955	1028	15,5	55,8	64	308
8	Kilbłok 4	IMŻ	718	718	2,5	6,1	42	-
9		Pioma Odlewnia	923	994	A ₅ =11,3	27,8	55	322
10	Kilbłok 5	IMŻ	813	814	2,5	3,0	42	-
11		Pioma Odlewnia	874	955	8,6	20,8	53	305

Typowe obrazy mikrostruktury i wtrąceń niemetalicznych występujących w odlewach z wytopów doświadczalnych przedstawiono na rysunkach 4, 5 i 6. We wszystkich badanych przypadkach, zarówno w kilbłokach małych 1, 2 i 3 jak i w kilbłokach dużych 4 i 5 występuje zbliżona mieszana struktura o przeważającym udziale wysoko odpuszczonego martenzytu i bainitu. Dominującym rodzajem wtrąceń niemetalicznych są drobne zmodyfikowane (kuliste) gliniany wapnia, typu 12·CaO·7Al₂O₃ (Rys. 6a), złożone wtrącenia tlenkowe CaO·Al₂O₃·MgO·SiO₂ oraz globularne złożone wtrącenia tlenkowo-siarczkowe (Rys. 6b).

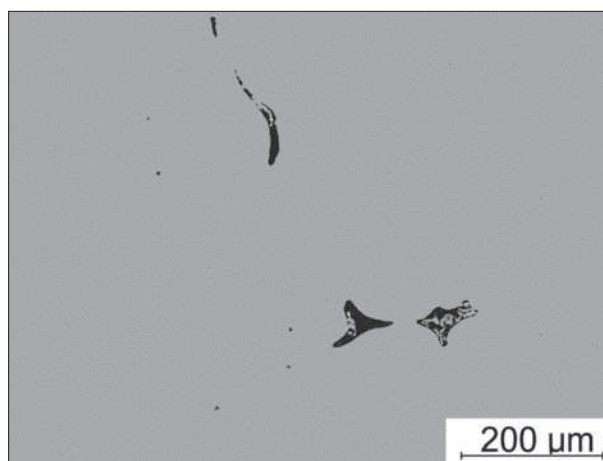
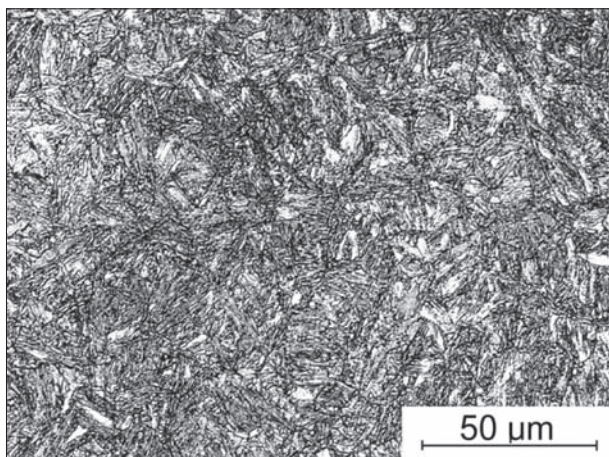
**Rys. 4. Wtrącenia niemetaliczne i pustki środkowe w środku kilbloku 5 z wytopu 3****Fig. 4. Non-metallic inclusions and central voids inside keel block no. 5 from melt no. 3**

Tabela 9. Wyniki badań właściwości mechanicznych odlewów z wytopu 3. Badania wykonano w Odlewni-Pioma

Table 9. Results of mechanical tests of castings from melt no. 3. Testing was carried at the Odlewnia-Pioma foundry

Lp.	Numer kilboku	R_e MPa	R_m MPa	A_4 %	Z %	Średnia udarność. KV2 (-40°C) J	Twardość. HBW5/750
1	Kilblok 1	976	1522	14,0	46,7	34	325
2	Kilblok 2	957	1033	14,5	49,6	55	325
3	Kilblok 3	962	1037	14,6	49,6	69	323
4	Kilblok 4	969	1045	8,4	22,6	58	340
5	Kilblok 5	889	987	6,3	17,2	61	323



Rys. 5. Mikrostruktura w obszarze środkowym w kilbloku 5 z wytopu 3

Fig. 5. Microstructure in the central area of keel block no. 5 from melt no. 3

Obok wtrąceń niemetalicznych, we wszystkich podanych ocenie kilblokach stwierdzono występowanie nieciągłości w postaci pustek (Rys. 4). Nieregularny kształt i układ pustek wskazuje, że są one wynikiem skurczu metalu w końcowej fazie czasu krzepnięcia. Nie stwierdzono występowania pustek w postaci pęcherzy.

Zbiornicze zestawienie wyników badań zawartości gazów oraz wtrąceń niemetalicznych występujących

w wytopie nadzorowanym 1 oraz w wytopach doświadczalnych o numerach 2 i 3 zamieszczono w tabeli 10.

Z danych zamieszczonych w tabeli 10 wynika, że zastosowane w trakcie wytwarzania wytopów doświadczalnych modyfikacje składu chemicznego staliwa i technologii wytapiania pozwoliły na zwiększenie czystości staliwa, zmniejszając powierzchniowy udział wtrąceń niemetalicznych z poziomu 0,50% (wytop nadzorowany) do 0,177% (drugi wytop doświadczalny). Uzyskano również pełną modyfikację wtrąceń niemetalicznych. W wytopie nadzorowanym dominującym rodzajem wtrąceń niemetalicznych były azotki tytanu o średniej wielkości od 2 do 13 μm oraz niezmodyfikowane tlenki glinu i siarczki manganu o średnicy równoważnej do 4 μm . W wytopach doświadczalnych występują wyłącznie kuliste gliniany wapnia i złożone tlenko-siarczki o średnicy równoważnej do 2,6 μm . Zmiana technologii wytapiania staliwa pozwoliła na znaczące obniżenie zawartości tlenu całkowitego z poziomu 106 ppm (wytop 1) do 62 ppm w wytopie 2 i do 77 ppm w wytopie 3, a tym samym na zmniejszenie całkowitej ilości wtrąceń niemetalicznych oraz uzyskanie wtrąceń niemetalicznych w postaci drobnych kulistych wydzieleni. Bezpośrednim efektem zastosowanej modyfikacji składu chemicznego staliwa i zmian w technologii wytapiania było podwyższenie właściwości ciągliwości odlewów. W przypadku pierwszego wytopu doświadczalnego wymagane właściwości mechaniczne odlewów (R_e min. 861 MPa, R_m min 930 MPa, A_4 min. 14,0% i KV2 przy -40°C min. 42 J) uzyskano dla kilbłków

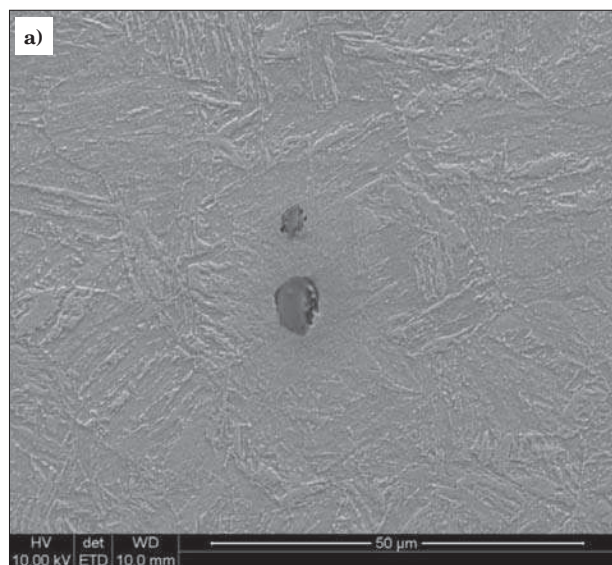
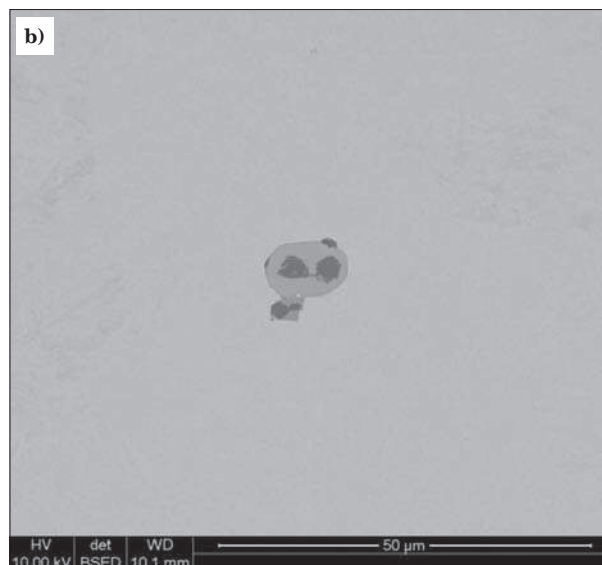
Rys. 6. Wtrącenia niemetaliczne w kilbloku 5 z wytopu 3 – drobne zmodyfikowane (kuliste) gliniany wapnia, typu $12\cdot\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (a) i $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$ (b)Fig. 6. Non-metallic inclusions in keel block no. 5 from melt no. 3 – fine modified (spherical) calcium aluminates $12\cdot\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (a) and $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$ (b)

Tabela 10. Zestawienie wyników badań zawartości gazów i ilościowej analizy wtrąceń niemetalicznych w odlewach z wytopu nadzorowanego i z wytopów doświadczalnych**Table 10. Summary of results of gas content testing and quantitative analysis of non-metallic inclusions in castings from supervised melt and experimental melts**

Lp.	Właściwość	Wytop nadzorowany, nr 1	Wytop doświadczalny, nr 2	Wytop doświadczalny, nr 3
1	Zawartość tlenu całkowitego, ppm	106	62	77
2	Zawartość azotu, ppm	84	75	90
3	Powierzchniowy udział wtrąceń niemetalicznych, %	0,500	0,305	0,177
4	Główny rodzaj wtrąceń niemetalicznych	TiN, Al ₂ O ₃ , MnS	kuliste gliniany wapnia, typu 12 CaO 7Al ₂ O ₃ , złożone tlenko-siarczki	kuliste gliniany wapnia, typu 12 CaO 7Al ₂ O ₃ , złożone tlenko-siarczki
5	Średnica równoważna przeważającej liczby wtrąceń niemetalicznych, μm	azotki od 2 do 13 tlenki i siarczki do 4	2,2÷2,6	do 2,0

o numerach 1 i 2. Pozostałe kilbloki o numerach 3, 4 i 5 spełniają wymagany poziom właściwości odnośnie do wartości granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i udarności, ale charakteryzują się niskimi wartościami wydłużenia i przewężenia. W drugim wytopie doświadczalnym wymagany poziom właściwości mechanicznych uzyskano dla kilbloków 1, 2 i 3. Pozostałe kilbloki, 4 i 5 wykazują niską plastyczność. Wartości A_4 i Z zawierają się odpowiednio w przedziałach od 6,3% do 8,4% i od 17,2% do 22,6%. Wszystkie kilbloki (1, 2, 3, 4 i 5) odlane z trzeciego wytopu doświadczalnego charakteryzują się wysoką udarnością. Średnia udarność, za wyjątkiem próbek pobranych z kilbloku nr 1, w temperaturze -40°C , mieści się w przedziale od 55 J do 69 J.

Badania kilbloków z drugiego wytopu doświadczalnego wykazały, że główną przyczyną niskiej plastyczności i udarności było występowanie w odlanych kilblokach pęcherzy gazowych. W przypadku kilbloków 4 i 5 odlanych z trzeciego wytopu doświadczalnego obniżenie plastyczności zaobserwowane w próbach rozciągania jest związane z występowaniem pustek międzydendrytycznych zlokalizowanych w środku przekroju poprzecznego kilbloków. Pustki międzydendrytyczne występują we wszystkich kilblokach, jednak ze zwiększeniem wymiarów kilbloku następuje wzrost ich wielkości i natężenia. Wyniki badań Gulajewa [4] wykazały, że jedną z głównych przyczyn niskich właściwości plastycznych (wydłużenia i przewężenia) jest występowanie pustek. Ze wzrostem ich udziału objętościowego następuje zmniejszanie plastyczności. Przy udziale objętościowym pustek równym 2% wartość przewężenia obniża się do zera. Jednocześnie stwierdzono, że udarność odlewów nie zależy od procentowego udziału pustek. Według Gulajewa udarność odlewów zawierających od 0,5 do 2,0% pustek jest na tym samym poziomie.

Podobną zależność stwierdzono w badaniach wykonanych w ramach niniejszej pracy. Udarność wszystkich kilbloków, niezależnie od natężenia pustek jest wysoka i znacznie przewyższa wymagany poziom, natomiast ich obecność prowadzi do silnego obniżenia plastyczności odlewów.

Nie uzyskano zakładanej, wymaganej zawartości tlenu całkowitego w staliwie, wynoszącej mniej niż 25 ppm.

W celu zmniejszenia zawartości pustek w odlewach, reprezentowanych przez kilbloki 4 i 5 należy zastosować pozapiecową rafinację ciekłego staliwa, przenosząc rafinację staliwa do kadzi z nagrzewaniem łukowym, jak również zastosować zasadowe wyłożenie ogniotrwałe oraz próżniowe odgazowanie staliwa w celu usunięcia gazowych zanieczyszczeń (H, N, O) ze staliwa.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie badań przeprowadzonych można sformułować następujące wnioski:

1. Wprowadzona modyfikacja składu chemicznego staliwa (usunięcie ze składu staliwa tytanu z jednoczesnym podwyższeniem zawartości węgla, chromu, niklu oraz molibdenu) pozwoliła na wyeliminowanie w odlewach dużych cząstek TiN, które były jedną z przyczyn ich niskiej udarności. Jednocześnie, zmodyfikowany skład chemiczny staliwa gwarantuje wysoką hartowność staliwa, a tym samym uzyskanie po obróbce cieplnej we wszystkich kilblokach struktury z dominującym udziałem wysoko odpuszczonego martenzytu.
2. Zastosowane zmiany w technologii wytapiania staliwa (wprowadzenie wysokoglinkowego wyłożenia ogniotrwałego do kadzi, modyfikacji wtrąceń niemetalicznych za pomocą wapnia) umożliwiają znaczne zwiększenie czystości staliwa, zarówno pod względem rodzaju występujących wtrąceń, jak i ich wielkości oraz liczby.
3. Wprowadzone zmiany w zakresie składu chemicznego i technologii wytapiania staliwa gwarantują wyprodukowanie odlewów o wielkości równoważnej kilblokom 1, 2 i 3, które spełniają wymagania odnośnie do poziomu właściwości mechanicznych R_e min. 861 MPa, R_m min. 930 MPa, A_4 min. 14,0%, Z min. 45% i KV_2 w -40°C min. 42 J.
4. Niskie właściwości plastyczne stwierdzone na próbkach wytrzymałościowych pobranych z kilbloków 4 i 5 są wynikiem występowania dużej liczby skurczowych pustek środkowych.
5. Nie uzyskano zakładanej, wymaganej zawartości tlenu całkowitego w staliwie wynoszącej mniej niż 25 ppm. Dla uzyskania takiej zawartości tlenu całkowitego konieczne jest zastosowanie procesu odgazowania próżniowego staliwa i stosowanie zasadowego, magnezytowego wyłożenia ogniotrwałego w kadzi.
6. W celu zmniejszenia zawartości pustek w odlewach, reprezentowanych przez kilbloki 4 i 5 należy zastosować pozapiecową rafinację ciekłego staliwa, przenosząc rafinację staliwa do kadzi z nagrzewaniem łukowym, jak również zastosować zasadowe wyłożenie ogniotrwałe oraz próżniowe odgazowanie staliwa w celu usunięcia gazowych zanieczyszczeń (H, N, O) ze staliwa.

LITERATURA

1. Specyfikacja materiałowa odbioru według wymagań klienta
2. Zdonek B., Żak A., Adamczyk M.: sprawozdanie IMŻ B0-1413 z pracy „Badania i ocena możliwości produkcji w warunkach techniczno-technologicznych PIOMA-Odlewnia Sp. z o.o. nowego asortymentu odlewów ze staliwa do zastosowań w niskich temperaturach”, grudzień 2013, Niepublikowane
3. Zdonek B., Żak A., Adamczyk M.: sprawozdanie IMŻ B0 - 1422 z pracy „Wykonanie badań hartowności i właściwości mechanicznych odlewów z wytopu doświadczalnego po obróbce cieplnej”, luty 2014, Niepublikowane
4. Kniaginina G.: Odlewnictwo staliwa, PWN 1956, s. 35-36 z Gulajew B.B.: „Puti powyszenija miechaniczeskich swoist otliwok” WNITOŁ, Moskwa 1953