

Krzysztof KOSTRZEWA  
Włodzimierz KUTERA

Grupa PGO, PIOMA – Odlewnia Sp. z o.o.

Bogdan ZDONEK  
Artur ŻAK  
Ireneusz SZYPUŁA

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza ■ Łukasiewicz Research Network – Institute of Ferrous Metallurgy

Jan JEZERSKI

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny ■ Silesian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering

# ZASTOSOWANIE PROCESU AOD W PRODUKCJI ODLEWÓW STALIWNYCH DO PRACY W EKSTREMALNYCH WARUNKACH EKSPLOATACJI

## APPLICATION OF THE AOD PROCESS IN THE PRODUCTION OF STEEL CASTINGS TO USE IN EXTREME OPERATING CONDITIONS

*Wymagania do eksploatacji odlewów staliwnych w ekstremalnych warunkach dotyczą gatunków od nisko- do wysokostopowych wytwarzanych z zastosowaniem pozapiecowej obróbki staliwa w celu uzyskania bardzo dokładnej regulacji składu chemicznego oraz zapewnienia bardzo wysokiej czystości staliwa. Optymalnym rozwiązaniem dla warunków odlewni było zastosowanie konwertora AOD (po raz pierwszy w Polsce) do rafinacji staliwa spuszczonego z pieców: łukowego i indukcyjnego. Zbadano pod względem jakości odlewy ze staliwa niskostopowego do pracy w niskich temperaturach, staliwa wysokostopowego, martenzytycznego do pracy w wysokich temperaturach i wysokostopowego duplex, do pracy w środowiskach wysoce korozyjnych. Zastosowanie procesu AOD zapewni odlewni znaczne powiększenie portfela zamówień, zarówno krajowych jak i na eksport, przy równoczesnym zwiększeniu rentowności produkcji odlewni.*

**Słowa kluczowe:** konwertor AOD, odlew staliwny, ekstremalne warunki pracy

*Requirements for the use of steel castings in extreme conditions apply to grades from low- to high-alloyed produced with the use of secondary treatment of cast steel in order to obtain very accurate regulation of the chemical composition and to ensure very high purity of the cast steel. The optimal solution for foundry conditions was the use of an AOD converter (for the first time in Poland) for the refining of steel cast from electric arc furnace. In terms of internal quality, low-alloy cast steel castings for low temperature operation, high-alloy martensitic cast steel for high temperature operation and high-alloy duplex casting for high corrosive environments were tested. The application of the AOD process will provide the foundry with a significant increase in its domestic and international portfolio, while increasing the profitability of the foundry's production.*

**Keywords:** AOD converter, steel casting, extreme working conditions

### 1. WSTĘP

Na świecie nasila się tendencja zastępowania w konstrukcji maszyn i urządzeń elementów kutych i spawanych jednoczęściowymi odlewami lub elementami złożonymi z kilku odlewów. Rozwój gospodarczy oraz konieczność zwiększania zasięgu prowadzonej działalności powodują, że coraz bardziej poszukiwane są na rynku tworzywa pozwalające na zastosowanie odlewów w ekstremalnych warunkach pracy, m.in. w temperaturze minus 60°C (obszary arktyczne), czy na głębokościach większych niż 3000 m (obszary podwodne). Te trendy rynkowe stały się podstawą dla Odlewni

### 1. INTRODUCTION

There is a growing tendency in the world to replace the forged and welded elements in the construction of machines and devices with one-piece castings or elements composed of several castings. Economic development and the need to increase the range of conducted operations mean that plastics, allowing for the use of castings in extreme operating conditions, including at negative 60°C (Arctic areas) or at depths greater than 3000 m (underwater areas), are increasingly in demand on the market. These market trends have become the basis for Odlewnia PIOMA to start work on developing

PIOMA do rozpoczęcia prac nad opracowaniem staliwa przeznaczonego do zastosowania w ekstremalnych warunkach. Spełnienie wymagań jakościowych staliwa konstrukcyjnego do zastosowań w tej niskiej temperaturze wiąże się z zapewnieniem wysokiej jakości, w tym głównie czystości staliwa w nowoczesnych procesach pozapiecowej rafinacji ciekłego metalu.

## 2. KONCEPCJA TECHNOLOGICZNA POZAPIECOWEJ OBRÓBKII STALIWA

PIOMA Odlewania Oddział w Piotrkowie Trybunalskim wchodzi w skład Polskiej Grupy Odlewniczej S.A. i wyposażona jest w dwa piece łukowe o pojemnościach 3 i 6 ton oraz w dwa piece indukcyjne o pojemnościach 3 t każdy. W piecach łukowych wytapia się staliwa niskostopowe i rafinuje w piecu oraz w kadzi podczas spustu. W piecach indukcyjnych wytapia się staliwa wysokostopowe, na odlewy dla przemysłu energetycznego (martenzytyczne) i chemicznego (duplex), stosując jako wsad czyste składniki stopowe, podrażające koszt produkcji odlewów. Dotychczasowa jakość staliwa konstrukcyjnego, niskostopowego z pieców łukowych zapewnia spełnienie wymaganego poziomu udarności, wynoszącego  $40 \text{ J/cm}^2$  przy minus  $40^\circ\text{C}$ , jedynie dla odlewów cienkościennych, o grubości do 25 mm.

Do głównych pierwiastków charakteryzujących wysoką czystość staliwa zalicza się fosfor, siarkę i tlen całkowity. W odniesieniu do staliw niskostopowych, konstrukcyjnych, do pracy w temperaturach do minus  $60^\circ\text{C}$  ich zawartości powinny być następujące: P – max. 0,005%; S – max. 0,002% i  $O_{\text{całk}}$  – max 10 ppm (lub 0,001%). Wymagany wskaźnik czystości K4 (zanieczyszczenie wtrąceniami tlenko-siarczkowymi) wg DIN 50602 powinien być mniejszy niż 10. W odniesieniu do staliw wysokostopowych z chromem i z bardzo niską zawartością węgla, jego zawartość w gotowym staliwie nie może być większa niż 0,03%. Urządzenie do procesu rafinacji pozapiecowej staliwa powinno też zapewniać uzyskiwanie zarówno bardzo niskich (max 0,004%), jak i wysokich (0,20%) zawartości azotu w staliwie.

W dotychczasowej technologii odlewa się odlewy o masie większej niż pojemność jednego pieca, poprzez zalewanie formy staliwem z dwóch kadzi, z dwóch różnych pieców. Nowoczesne urządzenie do rafinacji stali powinno być przystosowane do obróbki ciekłego staliwa z dwóch pieców.

Analiza fachowej literatury pod kątem doboru optymalnej technologii pozapiecowej rafinacji staliwa, od niskowęglowego i niskostopowego, do niskowęglowego, wysokostopowego, z dużą zawartością azotu dla odlewni [1–8], w urządzeniach o małej pojemności ciekłego metalu (6÷12 ton) [9–11] wskazała na wybór, dla technicznych warunków odlewni, procesu AOD – argonowo-tlenowego odwęglania staliwa w konwertorze z bocznym dmuchem za pomocą mieszaniny argonu lub azotu z tlenem.

## 3. DEMONSTRACYJNA INSTALACJA AOD

Urządzenie AOD, pierwsze w Polsce, z konwertorem o pojemności 8 ton, dostarczyła i wybudowała szwedzka firma UHT (UVÅN HAGFORS TEKNOLOGI AB) [12]. Rysunek 1 przedstawia schemat konwertora AOD. W kwietniu 2019 roku rozpoczęto pod nadzorem tej firmy gorący rozruch, a następnie przystąpiono do etapu wstępnej eksploatacji konwertora. Konwertor AOD zasilany jest z pieców łuko-

cast steel for use in extreme conditions. Meeting the quality requirements of structural cast steel for applications at this low temperature is associated with ensuring high quality, including mainly cast steel purity in modern processes of secondary refining of liquid metal.

## 2. TECHNOLOGICAL CONCEPT OF SECONDARY CAST STEEL TREATMENT

PIOMA Odlewnia in Piotrków Trybunalski is part of Polska Grupa Odlewnicza S.A. and is equipped with two arc furnaces with a capacity of 3 and 6 tons and two induction furnaces with a capacity of 3 tons each. Low-alloy cast steel is melted in arc furnaces and refined in the furnace and ladle during tapping. High-alloy steel castings are melted in induction furnaces for castings for the energy (martensitic) and chemical (duplex) industries, using pure alloying components that make the casting production cost more expensive. The current quality of low-alloy structural cast steel from arc furnaces ensures that the required impact level of  $40 \text{ J/cm}^2$  at negative  $40^\circ\text{C}$  is met only for thin-walled castings up to 25 mm thick.

The main elements characterising high purity of cast steel include phosphorus, sulphur and total oxygen. For low-alloy structural steel to work at temperatures down to negative  $60^\circ\text{C}$  their contents should be as follows: P – max. 0.005%; S – max. 0.002% and  $O_{\text{całk}}$  – max. 10 ppm (or 0.001%). The required K4 purity index (contamination with oxide and sulphide inclusions) according to DIN 50602 should be less than 10. For high-alloy steel with chromium and with very low carbon content, its content in finished cast steel may not be greater than 0.03%. The device for the secondary casting steel refining process should also provide very low (max. 0.004%) and high (0.20%) nitrogen content in the cast steel.

In the current technology, castings with a weight greater than the capacity of one furnace are melted by pouring cast steel from two ladles, from 2 different furnaces, into a mould. A modern steel refining device should be adapted to processing liquid cast steel from two furnaces.

The analysis of professional literature in terms of selection of optimal technology for secondary steel refining, from low-carbon and low-alloy to low-carbon high-alloy with high nitrogen content for foundries [1–8] in equipment with low capacity of liquid metal (6–12 tons) [9–11] pointed to the selection of the AOD argon oxygen decarburisation process of cast steel in a side-blown converter using a mixture of argon or nitrogen with oxygen for the technical conditions of foundries.

## 3. DEMONSTRATION AOD INSTALLATION

The AOD device, the first in Poland, with a converter with a capacity of 8 tons, was supplied and built by the Swedish company UHT (UVÅN HAGFORS TEKNOLOGI AB) [12]. Figure 1 shows a diagram of the AOD converter. In April 2019, the hot start was initiated under the supervision of this company, and then the initial operation of the converter was started. The AOD converter is supplied by 3 or 6

wych o pojemności 3 lub 6 ton. Konwerter AOD jest w pełni zautomatyzowany i sterowany za pomocą systemu kontroli procesu UTCAS poziom 2. Rysunki 2–4 przedstawiają widok konwertora AOD w różnych fazach procesu.

Wyłożenie ogniotrwale konwertora w warstwie roboczej wykonano z materiałów magnezytowych, z niską zawartością węgla.

Proces w konwertorze AOD odbywa się w trzech etapach. Pierwszy etap to – podgrzewanie chemiczne ciekłego metalu dostarczonego z pieca łukowego za pomocą utleniania krzemu w kąpieli metalowej tlenem wdmuchiwanym w osłonie argonu przez boczne dysze, po którym następuje etap drugi – odwęglanie kąpieli metalowej, przy zmiennym stosunku

ton arc furnaces. The AOD converter is fully automated and controlled using the UTCAS level 2 process control system. Figures 2 to 4 show a view of the AOD converter at various stages of the process.

The refractory lining of the converter in the working layer is made of magnesite materials with low carbon content.

The process in the AOD converter takes place in three stages. First stage – chemical heating of the liquid metal supplied from the arc furnace by means of oxidation of silicon in a metal bath with oxygen blown in argon gas through side nozzles, followed by the second stage – decarburising the metal bath with a variable ratio of blown oxygen and argon or nitrogen and variable gas flow rate, and after reach-



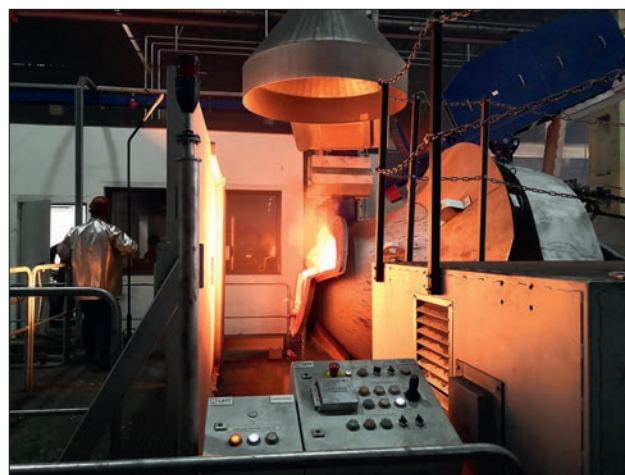
Rys. 1. Schemat konwertora AOD, o pojemności 8 ton w Odlewni PIOMA

Fig. 1. Diagram of the AOD converter, with a capacity of 8 tons at the PIOMA Foundry



Rys. 2. Widok konwertora AOD z pokoju sterowania podczas fazy dmuchania

Fig. 2. View of the AOD converter from the control room during the blowing phase



Rys. 3. Przechylenie konwertora AOD do pomiaru temperatury i pobrania próbki do analizy chemicznej

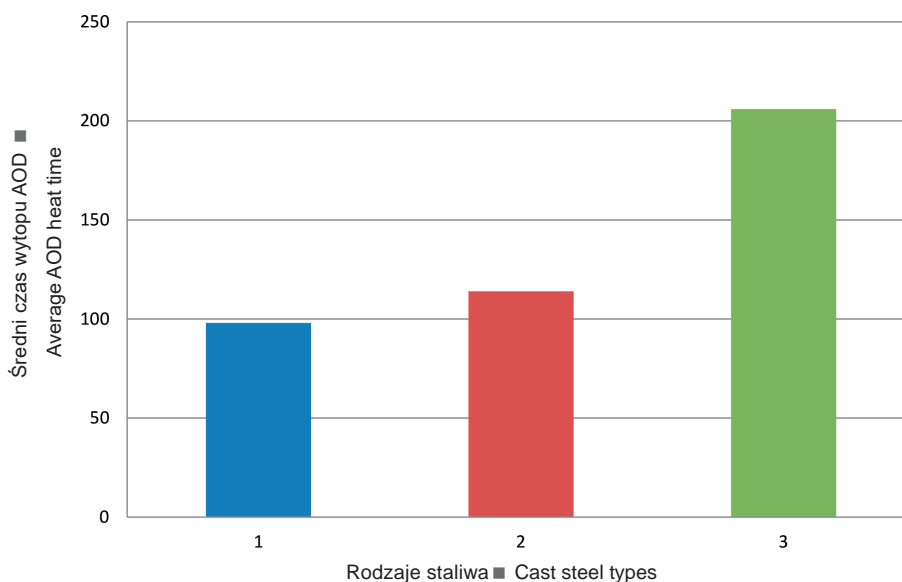
Fig. 3. Tilt of the AOD converter for temperature measurement and sampling for chemical analysis



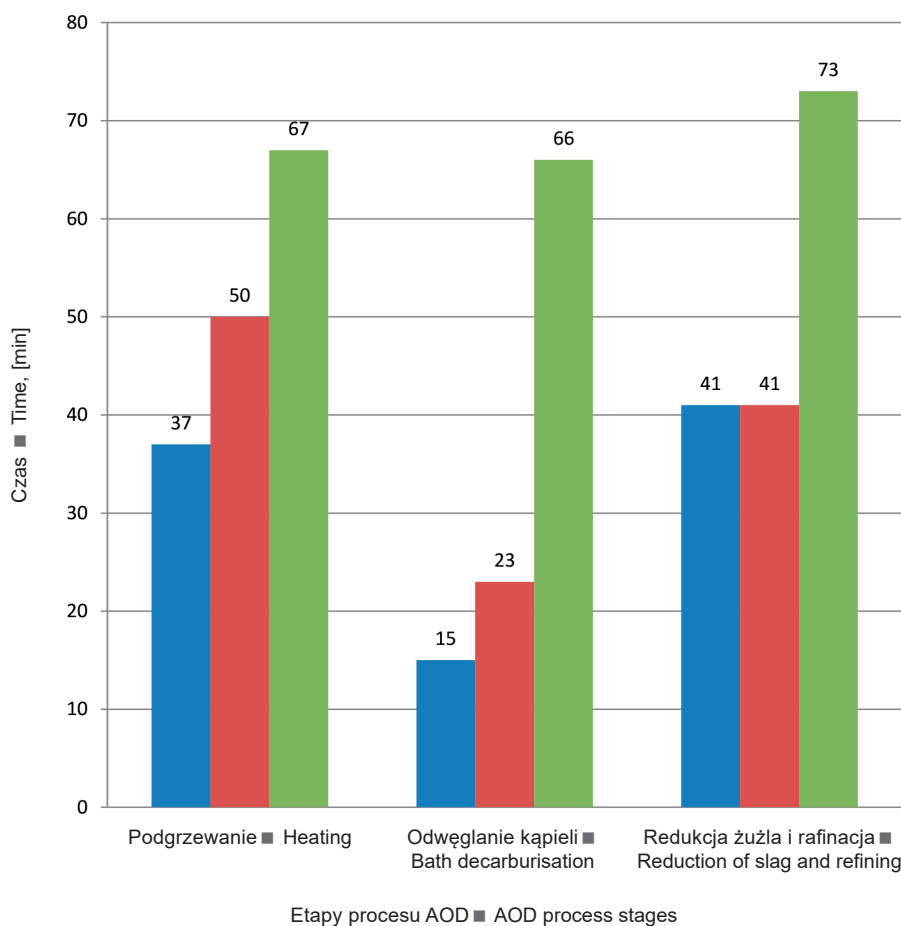
Rys. 4 Przechylenie konwertora AOD do spustu staliwa do kadzi

Fig. 4 Tilting the AOD converter to tapping cast steel into the ladle





Rys. 5. Średni czas wytopu w AOD dla staliw 1 – niskostopowych, 2 – martenzytycznego i 3 – duplex  
 Fig. 5. Average heat time in AOD for 1 – low-alloy, 2 – martensitic and 3 – duplex steel



Rys. 6. Średni czas etapów procesu AOD dla staliw niskostopowych, martenzytycznego i duplex (oznaczenia kolorów jak na rys. 5)  
 Fig. 6. The average time of the AOD process stages for low-alloy, martensitic and duplex steel (color designations as in Fig. 5)

wdmuchiwanego tlenu i argonu lub azotu i zmiennym natężeniu przepływu gazu i po osiągnięciu wymaganej zawartości węgla w kąpieli metalowej następuje etap trzeci – odtlanie kąpieli metalowej, redukcja żużla i korekta składu chemicznego ciekłego staliwa, przy wdmuchiwaniu tylko samego gazu obojętnego, argonu lub azotu, przy czym w ostat-

ing the required carbon content in the metal bath, the third stage is carried out – deoxidation of the metal bath, reduction of slag and correction of the chemical composition of liquid cast steel, when blowing only inert gas, argon or nitrogen; during the last 2 minutes of the process, gentle flushing mixing is used with a minimum flow of argon. After obtain-

nich 2 minutach procesu stosuje się delikatne, płuczące mieszanie przy minimalnym przepływie argonu. Po uzyskaniu przepisanej składu chemicznego próbki metalu i temperatury następuje spust ciekłego staliwa do kadzi odlewniczej. Na rysunkach 5 i 6 zamieszczono wykresy przedstawiające średnie (całkowite i poszczególnych etapów) czasy wytopów w konwertorze AOD staliw niskostopowych, wysokostopowych martenzytycznych i niskowęglowych, wysokochromowych staliw typu duplex.

#### 4. WYNIKI BADAŃ JAKOŚCIOWYCH DOŚWIADCZALNYCH ODLEWÓW Z KONWERTORA AOD

Doświadczalne odlewy staliwne do pracy w ekstremalnych warunkach z wytopów wykonanych w konwertorze AOD obejmują staliwa niskostopowe konstrukcyjne do pracy w krytycznych warunkach, staliwo martenzytyczne i staliwo duplex. W tabeli 1 zamieszczono składy chemiczne staliw z poszczególnych grup gatunkowych.

Badania wykonano na próbkach wyciętych z prób świadków – P1 (koniczynki) w odległości około 20 mm od powierzchni górnej („głowa”). Badania wtrąceń niemetalicznych przeprowadzono pod kątem składu chemicznego, za pomocą mikroskopu skaningowego Inspect F z wykorzystaniem detektora BSE oraz pod kątem ilościowego określenia wtrąceń niemetalicznych, za pomocą mikroskopu świetlnego Nikon Epiphot 200 oraz mikroskopu skaningowego Inspect F.

Rodzaje wtrąceń niemetalicznych, charakterystycznych dla każdej grupy gatunkowej staliwa przedstawiono na rysunkach 7–9.

Generalnie są to bardzo drobne kompleksowe tlenki na osnowie spineli, trudne do usunięcia ze staliwa z wydzielnymi na nich podczas krzepnięcia: MnS, TiN i AlN.

Wartości współczynnika K<sub>4</sub>, zawartości tlenu całkowitego, udziału powierzchniowego wtrąceń i porowatości oraz średniej średnicy równoważnej wtrąceń w odlewach doświadczalnych wykonanych według technologii demonstracyjnej (AOD) i według technologii tradycyjnej – w piecu łukowym lub indukcyjnym (T) przedstawiono w tabeli 2.

ing the prescribed chemical composition of the metal sample and temperature, the liquid cast steel is tapped into the foundry ladle. Figures 5 and 6 contain diagrams showing the average total melting times and those at individual stages in the AOD converter for low-alloy, high-alloy martensitic and low-carbon, high-chromium duplex cast steels.

#### 4. RESULTS OF QUALITATIVE TESTS OF EXPERIMENTAL CASTS FROM THE AOD CONVERTER

Experimental steel castings for operation in extreme conditions from melts made in the AOD converter include low-alloy structural cast steels for work in critical conditions, martensitic cast steel and duplex cast steel. Table 1 shows the chemical compositions of cast steels from individual grade groups.

The tests were carried out on samples cut out from the indicator runs – P1 (clovers) at a distance of approximately 20 mm from the upper surface (“head”). The examination of non-metallic inclusions was carried out for chemical composition, using an Inspect F scanning microscope with a BSE detector, and for quantitative determination of non-metallic inclusions, using a Nikon Epiphot 200 light microscope and an Inspect F scanning microscope.

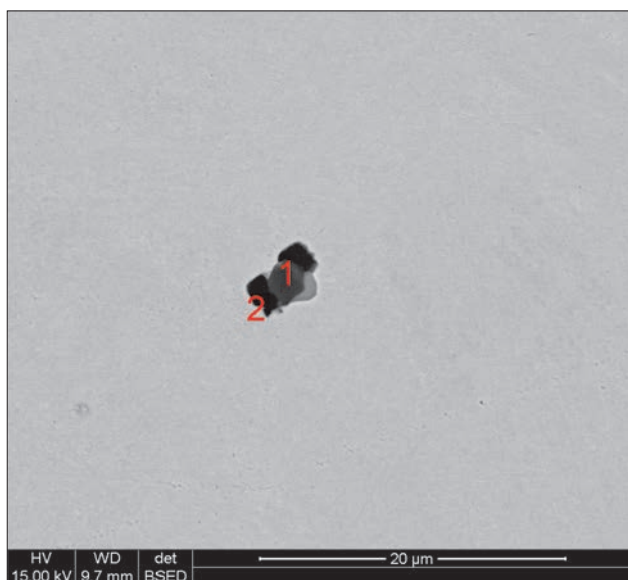
The types of non-metallic inclusions characteristic for each cast steel grade are presented in Figures 7–9.

Generally, they are very fine complex oxides on a spinel matrix, difficult to remove from cast steel with MnS, TiN and AlN precipitated on them during solidification.

The values of the K<sub>4</sub> coefficient, total oxygen content, surface content of inclusions and porosity, and average equivalent diameter of inclusions in experimental castings made using the demonstration technology (AOD) and the traditional technology – in an arc or induction furnace (T) are presented in Table 2.

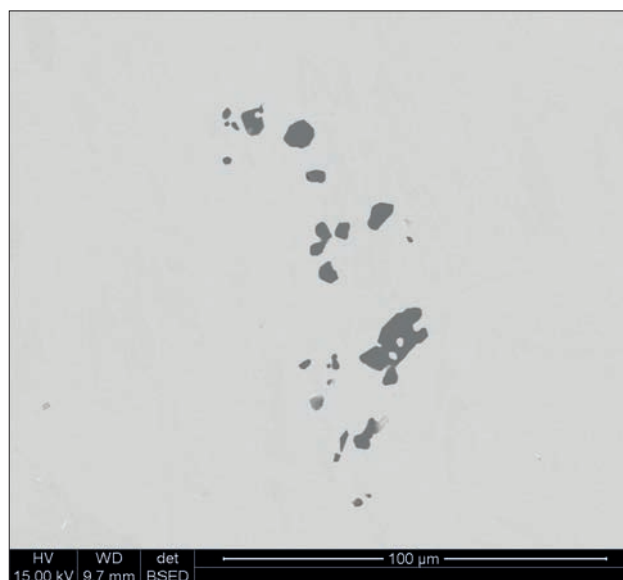
Tabela 1. Wymagane składy chemiczne gatunków staliw na odlewy doświadczalne z wytopów w konwertorze AOD  
Table 1. Required chemical compositions of cast steel grades for experimental castings from the AOD converter

Lp. ■ No.	Rodzaj stali ■ Steel type	Zakres zawartości pierwiastków, [% mas.] ■ Element content range, [wt %]											
	Gatunek ■ Grade	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	N	V	Nb
1	Do pracy w krytycznych warunkach (-25°C) ■ For operation in critical conditions (-25°C) A6 BS3100	0,27 ÷ 0,31	0,30 ÷ 0,50	1,35 ÷ 1,55	max 0,020	max 0,015	max 0,15	max 0,10	0,10 ÷ 0,12	0,02 ÷ 0,04		max 0,05	
2	Do pracy w krytycznych warunkach (-60°C) ■ For operation in critical conditions (-60°C) Grade135-125 CMS-01	0,13 ÷ 0,20	0,20 ÷ 0,60	0,60 ÷ 1,00	max 0,015	max 0,005	0,55 ÷ 1,00	1,50 ÷ 2,00	0,35 ÷ 0,55	0,01 ÷ 0,03		0,03 ÷ 0,06	
3	Stal martenzytyczna ■ Martensitic steel GX12CrMoVNbN9-1 Stg9T, wg 9ANM ■ per 9ANM 600212	0,10 ÷ 0,14	0,20 ÷ 0,50	0,30 ÷ 0,60	max 0,02	max 0,01	8,0 ÷ 9,5	max 0,40	0,85 ÷ 1,05	max 0,02	0,03 ÷ 0,07	0,18 ÷ 0,25	0,06 ÷ 0,10
4	Stal F-A Duplex ■ F-A Duplex steel X 2CrNiMoN22-5-3 1.4462	max 0,03	max 1,0	max 2,0	max 0,035	max 0,015	21,0 ÷ 23,0	4,5 ÷ 6,5	2,5 ÷ 3,5		0,10 ÷ 0,22		



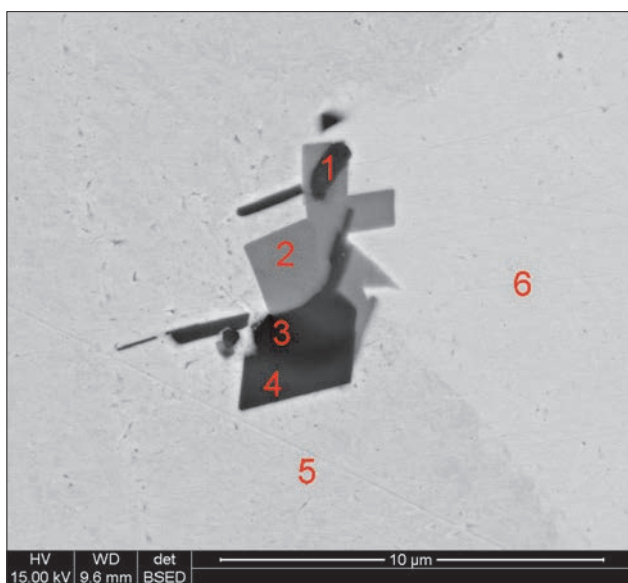
Rys. 7. Kompleksowe wtrącenie niemetaliczne w próbce staliwa niskostopowego, gat.A6, wytop AOD nr 50024 (skład chemiczny wytopu w % masy: C - 0,14; Mn - 1,43; Si - 0,49; P - 0,018; S - 0,003; Cr - 0,15; Ni - 0,12; Mo - 0,12; Al - 0,02; N - 0,0078); skład wtrącenia: 1 -  $TiO_2 \cdot MgO \cdot Al_2O_3 + MnS$ ; 2 -  $(Ti, Al)N$

Fig. 7. Complex non-metallic inclusion in a sample of low-alloy cast steel, grade A6, AOD heat No. 50024 (chemical composition of the heat in weight %: C - 0.14; Mn - 1.43; Si - 0.49; P - 0.018; S - 0.003; Cr - 0.15; Ni - 0.12; Mo - 0.12; Al - 0.02; N - 0.0078); inclusion composition: 1 -  $TiO_2 \cdot MgO \cdot Al_2O_3 + MnS$ ; 2 -  $(Ti, Al)N$



Rys. 8. Wtrącenia niemetaliczne w próbce ze staliwa GX12CrMoVNbN9-1 (martenzytyczne), wytop 50005 (skład chemiczny wytopu w % masy: C - 0,087; Mn - 0,51; Si - 0,42; P - 0,019; S - 0,012; Cr - 9,27; Ni - 0,26; Mo - 0,86; Al - 0,017; V - 0,22; Nb - 0,086; N - 0,0475), skupisko  $Al_2O_3$

Fig. 8. Non-metallic inclusions in the sample of cast steel GX12CrMoVNbN9-1 (martensitic), heat No. 50005 (chemical composition of the heat in weight %: C - 0.087; Mn - 0.51; Si - 0.42; P - 0.019; S - 0.012; Cr - 9.27; Ni - 0.26; Mo - 0.86; Al - 0.017; V - 0.22; Nb - 0.086; N - 0.0475), cluster  $Al_2O_3$



Rys. 9. Kompleksowe wtrącenia niemetaliczne w próbce staliwa GX2CrNiMoN22-5-3 (duplex), wytop 50025 (skład chemiczny wytopu w % masy: C - 0,10; Mn - 0,52; Si - 0,94; P - 0,022; S - 0,0017; Cr - 20,95; Ni - 4,86; Mo - 2,52; Al - 0,087; V - 0,034; N - 0,20); 1 -  $TiO_2 \cdot CaO \cdot MgO \cdot Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3$ , 2 - TiN, 3 -  $TiO_2 \cdot MgO \cdot Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3$ , 4 -  $MgO \cdot Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3$ , 5 - ferryt, 6 - austenit

Fig. 9. Complex non-metallic inclusions in the cast steel sample GX2CrNiMoN22-5-3 (duplex), heat No. 50025 (chemical composition of the heat in weight %: C - 0.10; Mn - 0.52; Si - 0.94; P - 0.022; S - 0.0017; Cr - 20.95; Ni - 4.86; Mo - 2.52; Al - 0.087; V - 0.034; N - 0.20); 1 -  $TiO_2 \cdot CaO \cdot MgO \cdot Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3$ , 2 - TiN, 3 -  $TiO_2 \cdot MgO \cdot Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3$ , 4 -  $MgO \cdot Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3$ , 5 - ferryt, 6 - austenite

Wartości wskaźnika K4 (stopień zanieczyszczenia stali wtrąceniami tlenkowymi i siarczkowymi), wymaganego dla odlewów ze staliwa niskostopowego, dla wytopów obrabianych w konwertorze są znacznie mniejsze (śr. 20) niż dla wytopów według tradycyjnej technologii (śr. 35). Zawartości tlenu całkowitego w staliwie z wytopów AOD, aczkolwiek nie są bardzo niskie (33÷56 ppm), to są mniejsze niż w wytopach według tradycyjnej technologii (45÷67 ppm). Czystość staliwa mierzona wielkością powierzchniowego udziału wtrąceń niemetalicznych i pustek skurczowych w próbkach staliwa z wytopów AOD jest dla staliwa niskostopowych mniejsza (śr. 0,06%) niż dla wytopów według technologii tradycyjnej z pieca łukowego (śr. 0,11%) i porównywalna - dla wytopów

The values of the K4 index (the degree of steel contamination with oxide and sulphide inclusions), required for low-alloy cast steel castings, for melts processed in the converter are much smaller (20 on average) than for melts produced using traditional technology (35 on average). Total oxygen content in cast steel from AOD heats, although not very low (33–56 ppm), it is lower than in heats obtained using traditional technology (45–67 ppm). Cast steel purity measured by the size of the surface fraction of non-metallic inclusions and shrinkage voids in AOD cast steel samples is lower for low-alloy cast steels (0.06% on average) than for melts obtained using traditional technology from an arc furnace (0.11% on average) and comparable for melts from

Tabela 2. Zestawienie wartości współczynnika K4, zawartości tlenu całkowitego, udziału powierzchniowego wtrąceń i porowatości oraz średniej średnicy równoważnej wtrąceń w odlewach doświadczalnych wykonanych według technologii tradycyjnej, w piecu łukowym (T) i indukcyjnym (TI) oraz demonstracyjnej (AOD)

Table 2. Value statement of the K4 coefficient, total oxygen content, surface share of inclusions and porosity, and average equivalent diameter of inclusions in experimental castings made according to traditional technology, in EAF (T) and induction furnace (TI) and demonstration technology (AOD)

Lp. ■ No.	Numer wytopu, Technologia ■ Heat number, Technology	Gatunek staliwa/grupa ■ Cast steel grade/group	Wartość K4 ■ K4 value [-]	Zawartość O <sub>całk.</sub> ■ O <sub>całk.</sub> content [ppm]	Udział powierzchniowy wtrąceń i porowatości ■ Surface fraction of inclusions and porosity [%]	Średnia średnica równoważna wtrąceń ■ Average equivalent diameter of inclusions [μm]
1	50001,AOD	A6/niskostopowe ■ low-alloy	10	-	0,02	5,43
2	50003,AOD	135-125 CMS-01 niskostopowe ■ low-alloy	-	40	-	-
3	50005,AOD	GX12CrMoVNb9-1 martenzytyczne ■ martensitic	20	56	0,07	2,55
4	50009,AOD	GS20Mn5/niskostopowe ■ low-alloy	60	-	0,01	4,83
5	50011,AOD	A6/niskostopowe ■ low-alloy	10	-	0,16	2,91
6	50024,AOD	A6/niskostopowe ■ low-alloy	10	-	0,05	2,68
7	50025/1,AOD	GX2CrNiMoN22-5-3 duplex	40	51	0,28	2,15
8	50025/2,AOD	GX2CrNiMoN22-5-3 duplex	-	38	0,25	2,18
9	50029,AOD	G9Ni10 martenzytyczne ■ martensitic	-	40	-	-
10	50032/AOD	A6/niskostopowe ■ low-alloy	-	33		
11	50033/AOD	A6/niskostopowe ■ low-alloy	-	46		
12	26274T	L35HM/niskostopowe ■ low-alloy	-	74	0,13	2,95
13	26313T	G32NiCrMo8-5-4/średniostopowe ■ medium-alloy	-	-	0,11	2,77
14	26343T	GD42CrMo4/niskostopowe ■ low-alloy	-	67	0,11	3,16
15	60391T	120-110/niskostopowe ■ low-alloy	-	46	0,10	3,37
16	69841T	DCAB500D/niskostopowe ■ low-alloy	-	61	0,11	3,32
17	71515TI	GX5CrNi19-10/wysokostopowe ■ high-alloy	-	61	0,07	2,71
18	71559TI	DCAB600D/niskostopowe ■ low-alloy	-	54	0,14	3,86
19	71560TI	GX12CrMoNbN9-1/wysokostopowe ■ high-alloy	-	62	0,08	2,91
20	61507/T	A6/niskostopowe ■ low-alloy	-	55		
21	61878/T	A6/niskostopowe ■ low-alloy	-	57		
22	62194/1/T	A6/niskostopowe ■ low-alloy	20	-		
23	62194/2/T	A6/niskostopowe ■ low-alloy	30	-		
24	62198/1/T	A6/niskostopowe ■ low-alloy	50	45		
25	62198/2/T	A6/niskostopowe ■ low-alloy	40	-		

Uwagi: 1 – odlew nr 1; 2 – odlew nr 2 ■ Notes: 1 – cast No. 1; 2 – cast No. 2

z pieca indukcyjnego, na bazie wsadu z czystych materiałów wsadowych. Duże wartości udziału powierzchniowego wtrąceń niemetalicznych w staliwie duplex z AOD świadczą o jeszcze nieopanowanej technologii jego rafinacji w konwertorze AOD w fazie wstępnej eksploatacji procesu AOD. Wielkość wtrąceń w staliwie z procesu AOD jest, z dwoma wyjątkami, mniejsza niż 3 μm, podczas gdy w staliwie z pieca łukowego, jest ona większa od 3 μm.

Z porównań tych wyników, że staliwo z konwertora AOD, nawet z wczesnego okresu jego eksploatacji, odznacza się większą czystością niż staliwo z tradycyjnego procesu.

an induction furnace, based on charge from pure charge materials. Large values of surface fraction of non-metallic inclusions in AOD duplex cast steel testify to the still uncontrolled technology of its refining in the AOD converter, in the initial phase of the AOD process operation. The size of inclusions in cast steel from the AOD process is, with two exceptions, less than 3 μm, while in cast steel from the arc furnace, it is greater than 3 μm.

These comparisons show that cast steel from the AOD converter, even from an early period of its operation, is characterised by greater purity than cast steel from a traditional process.

Najważniejsze parametry dotyczące czystości staliwa z konwertora AOD z wczesnego okresu eksploatacji oraz z tradycyjnej technologii zestawiono w tabeli 3.

Z danych zawartych w tabeli 3 wynika również, że staliwo z konwertora AOD odznacza się znacznie lepszymi wynikami czystości niż z procesu tradycyjnego.

W tabeli 4 zestawiono składy chemiczne i zasadowości żużli z doświadczalnych wytopów w konwertorze AOD. Z danych tych wynika, że podczas redukcji żużla w konwertorze AOD uzyskano niskie zawartości FeO, MnO i Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Małe wartości zasadowości CaO/SiO<sub>2</sub> po okresie redukcji wskazują, że do redukcji żużla stosowano głównie dodatek żelazokrzemu, natomiast duże wartości CaO/SiO<sub>2</sub> – że do redukcji stosowano glin. Stosowanie FeSi do redukcji żużla przyczynia się do mniejszego odsiarczenia staliwa i większej erozji wyłożenia ogniotrwałego konwertora, ale sprzyja usuwaniu wtrąceń niemetalicznych ze staliwa do żużla na skutek optymalnej płynności. Dodatek Al powoduje głębokie odtlenienie i odsiarczenie staliwa oraz zapewnia dobre warunki do pochłaniania wtrąceń niemetalicznych przez żużel, sprzyjając uzyskaniu większej czystości staliwa (mniejsze zawartości tlenu całkowitego w staliwie).

Skład chemiczny żużla z powierzchni wyłożenia ogniotrwałego konwertora AOD, z różnych jego miejsc charakterystycznych, po wykonaniu około 60 wytopów doświadczalnych, przedstawiony w tabeli 5, wskazuje na silne nasycenie tlenkami żelaza, chromu i wapnia, przyczyniając się do dużej erozji magnezytowego wyłożenia. W następnej kampanii za-

The data contained in Table 3 also show that cast steel from the AOD converter has much higher purity results than from a traditional process.

Table 4 summarises the chemical compositions and alkalinity of the slags from the experimental heats in the AOD converter. These data show that during the reduction of slag in the AOD converter, low FeO, MnO and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content was obtained. The low values of CaO/SiO<sub>2</sub> alkalinity after the reduction period indicate that mainly the addition of ferrosilicon was used to reduce the slag, while high values of CaO/SiO<sub>2</sub> indicate that aluminium was used for reduction. The use of FeSi for slag reduction contributes to less desulphurisation of cast steel and greater erosion of the refractory converter liner, but promotes the removal of non-metallic inclusions from cast steel into slag due to optimal fluidity. The addition of Al causes deep deoxidation and desulphurisation of cast steel and provides good conditions for the absorption of non-metallic inclusions by slag, favouring greater purity of cast steel (lower total oxygen content in cast steel).

The chemical composition of the slag from the refractory lining surface of the AOD converter, from its various characteristic locations, after performing about 60 experimental melts, presented in Table 5, indicates strong saturation with iron, chromium and calcium oxides, contributing to large erosion of the magnesite lining. In the next campaign, the AOD converter lining with chromium magnesite materials was used, more resistant to erosion, especially when refining duplex cast steel.

Tabela 3. Wskaźniki dotyczące czystości staliwa z konwertora AOD, z wczesnego okresu eksploatacji oraz z tradycyjnej technologii  
Table 3. Indicators regarding cast steel purity from the AOD converter, from early operation and from traditional technology

Wskaźnik, wartość średnia ■ Indicator, average value	Jedn. miary ■ Unit of meas.	Technologia AOD ■ AOD technology		Technologia tradycyjna ■ Traditional technology	
		Do osiągnięcia ■ To be obtained	Uzyskany dotychczas ■ Currently obtained	Piec łukowy ■ Arc furnace	Piec indukcyjny ■ Induction furnace
K 4 (S + O)	-	< 10	14	35	-
O <sub>całk</sub>	ppm	<10	30	55	59
P	%	<0,005	0,004	0,010	0,012
S	%	<0,002	0,0018	0,007	0,010
C	%	<0,03	0,0195 <sup>1)</sup> /0,024 <sup>2)</sup>	0,09	0,03

Uwagi: 1) po odwęgleniu w konwertorze AOD, 2) w gotowym odlewie ze staliwa duplex ■ Notes: 1) after decarburisation in the AOD converter, 2) in a finished duplex cast

Tabela 4. Składy chemiczne i zasadowości żużli z doświadczalnych wytopów w konwertorze AOD, % masowe  
Table 4. Chemical composition and basicity of slag from experimental melts in the AOD converter, weight %

Numer wytopu/gat staliwa ■ Heat number/steel gr.	Skład chemiczny, [% mas.] ■ Chemical composition, [wt %]									Zasadowość ■ Alkalinity	
	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
50019-2 niskostopowe ■ low-alloy	44,6	32,03	0,58	0,59	6,63	0,97	12,90	0,072	0,018	1,39	1,15
50025-2 duplex	44,9	3,50	0,58	0,08	39,3	0,79	9,41	0,011	<0,01	12,83	1,05
50035-2 niskostopowe ■ low-alloy	54,6	20,5	0,72	0,22	17,4	0,19	6,83	-	<0,01	2,66	1,44
50036-1 duplex	45,1	10,76	7,86	0,95	2,69	25,3	3,75	-	0,037	4,19	3,36
50043-1 duplex	43,68	5,41	14,83	0,56	0,65	20,41	3,02	-	<0,01	8,07	7,21
50043-2 duplex	52,15	36,20	0,58	0,17	1,59	0,53	7,16	-	<0,01	1,44	1,40

Oznaczenia: 1 – z konwertora AOD po odwęgleniu kąpieli metalowej; 2 – z konwertora AOD po okresie redukcji żużla, przed spustem staliwa z konwertora ■ Designations: 1 – from the AOD converter after decarburising the metal bath; 2 – from the AOD converter after a period of slag reduction, before tapping the steel from the converter



Tabela 5. Skład chemiczny żużla (garnisza) z różnych miejsc wyłożenia ogniotrwałego konwertora AOD po etapie gorącego rozruchu i wstępnej eksploatacji

Table 5. The chemical composition of slags from various places of lining the refractory AOD converter after the stage of hot start-up and initial operation

Żużel ze ścian AOD ■ Slag from AOD walls	Skład chemiczny, [% mas.] ■ Chemical composition, [wt %]								CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub> )
	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
1/bok prawy ■ right side	31,40	11,78	7,65	0,74	1,40	16,64	3,26	<0,01	2,67	2,38
2/bok lewy ■ left side	24,61	9,67	11,53	0,73	1,10	15,46	2,47	<0,01	2,54	2,29
3/dół ■ bottom	33,21	9,18	9,58	0,89	1,74	18,12	7,56	<0,01	3,62	3,04

stosowano wyłożenie konwertora AOD materiałami chromo – magnezytowymi, bardziej odpornymi na erozję, szczególnie przy rafinacji staliwa typu duplex.

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W odniesieniu do odlewów ze staliwa niskostopowego, przeznaczonych do pracy w niskich temperaturach, jak np. w gatunkach: GS-25CrMo4, 135-125 CMS-01, A6, poniżej -60°C, wymagane jest spełnienie minimalnej udurości 40 J. Dąży się w związku z tym do zapewnienia w staliwie, w procesie redukcji w konwertorze AOD, bardzo niskiej zawartości siarki (< 0,002%), tlenu całkowitego (<10 ppm) i małego udziału powierzchniowego wtrąceń niemetalicznych (<0,05%).

Zawartość tlenu całkowitego w staliwie zależy od skuteczności odwęglania kąpieli metalowej, rafinacji kąpieli z wtrąceń niemetalicznych w okresie redukcji w konwertorze AOD, rodzaju materiałów ogniotrwałych w procesie wytapiania i rafinacji staliwa, od temperatury kąpieli metalowej w procesie AOD, intensywności mieszania gazem obojętnym, czasu styku kąpieli metalowej z wyłożeniem ogniotrwałym oraz skuteczności atmosfery neutralnej w procesie odlewania staliwa do form. Uzyskiwane jak dotąd zawartości tlenu całkowitego w odlewach staliwnych, zarówno nisko-, jak i wysokostopowych mieszczą się w zakresie od 14 do około 40 ppm i są jak dotąd, w fazie wstępnej eksploatacji konwertora AOD, większe od przewidzianych do osiągnięcia. Rozrzut wartości zawartości tlenu całkowitego świadczy o dużej jeszcze niestabilności procesu w konwertorze AOD w początkowej fazie jego uruchamiania i eksploatacji. Długie są w szczególności czasy kontaktu kąpieli metalowej z wyłożeniem ogniotrwałym konwertora AOD, przy temperaturach znacznie przekraczających 1650°C. Czasy tego kontaktu, w okresach odwęglania i redukcji wahają się jak dotąd od 75 do nawet 230 minut i są średnio 2- do 3-krotnie dłuższe od standardowych (60÷90 minut). Praktycznie we wszystkich wtrąceniach niemetalicznych występujących w odlewach stwierdzono występowanie MgO, pochodzącego z ogniotrwałego wyłożenia. Opanowanie praktyki procesu AOD wpłynie znacząco na zbliżenie się z wartościami tlenu całkowitego w odlewach staliwnych do poziomu 15 ppm, następnie, po szczegółowej analizie i doskonaleniu procesu – do 10 ppm.

W staliwie wysokochromowym typu duplex, wytapianym w konwertorze AOD, po zakończeniu procesu odwęglania w konwertorze AOD uzyskiwano zawartości węgla w ciekłej kąpieli metalowej mniejsze niż 0,02%, jednakże w długotrwałym procesie redukcji żużla i rafinacji staliwa z wtrąceń niemetalicznych następował przyrost węgla w ciekłym staliwie do 0,024% z magnezytowych materiałów ogniotrwałych wyłożenia konwertora, które i tak zawierają bardzo niewielką ilość węgla (poniżej 3%) jako składnika substancji wiążą-

## 5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

For low-alloy steel castings intended for operation at low temperatures, e.g. in grades: GS-25CrMo4, 135-125 CMS-01, A6, a minimum impact strength of 40 J is required below -60°C. Therefore, in cast steels, the reduction process in the AOD converter is aimed at ensuring very low sulphur content (<0.002%), total oxygen (<10 ppm) and a low surface fraction of non-metallic inclusions (<0.05%).

The total oxygen content in the cast steel depends on the efficiency of metal bath decarburisation, refining of the bath from non-metallic inclusions during the reduction period in the AOD converter, the type of refractory materials in the cast steel smelting and refining process, the temperature of the metal bath in the AOD process, the intensity of inert gas mixing, contact time of the metal bath with refractory lining and the effectiveness of a neutral atmosphere in the process of casting steel into moulds. The total oxygen content obtained so far in steel castings, both low- and high-alloy, ranges from 14 to about 40 ppm and are, so far, in the initial phase of the AOD converter operation, higher than those expected to be achieved. The dispersion of the total oxygen content indicates that the process is still very unstable in the AOD converter at the initial stage of its start-up and operation. In particular, the contact times of the metal bath with the refractory lining of the AOD converter are long, at temperatures well above 1650°C. The times of this contact during periods of decarburisation and reduction have so far fluctuated from 75 to even 230 minutes and are on average 2 to 3 times longer than standard (60–90 minutes). Virtually all of the non-metallic inclusions found in the castings have been found to contain MgO from the refractory lining. Mastering the practice of the AOD process will significantly affect the approach of total oxygen values in steel castings to the level of 15 ppm, and then, after detailed analysis and process improvement – down to 10 ppm.

In the high-chromium duplex cast steel, melted in the AOD converter, after completing the decarburisation process in the AOD converter, carbon content in the liquid metal bath was less than 0.02%, however, in the long-term process of slag reduction and refining of cast steel from non-metallic inclusions, carbon in liquid cast steel increased up to 0.024% from magnesia refractory materials of the converter's lining, which still contain a very small amount of carbon (less than 3%) as a component of the binder. However, the long-term contact of the liquid cast steel with the lining in the slag reduction process, so far above 90 minutes on average, has resulted in a significant increase in carbon in the cast steel to over 0.05%. Currently, after applying a new

cej. Jednakże długotrwały kontakt ciekłego staliwa z wyłożeniem w procesie redukcji żużla, wynoszący, jak dotąd średnio powyżej 90 minut powodował znaczący przyrost węgla w staliwie, do ponad 0,05%. Obecnie, po zastosowaniu nowego wyłożenia ogniotrwałego, z materiałów chromitowych, z którego nie jest absorbowany C do metalu, uzyskuje się bez problemu wymaganą, niską zawartość węgla. Optymalizowany jest również sam proces AOD.

Obróbka cieplna odlewów ze staliw niskostopowych, wysokostopowych martenzytycznych i odpornych na korozję, z zawartością węgla mniejszą niż 0,03% stanowi, oprócz technologii wytapiania, drugi podstawowy element demonstracyjnej technologii produkcji odlewów o bardzo wysokich wymaganiach właściwości mechanicznych i użytkowych odlewów, przeznaczonych do ekstremalnych zastosowań.

Technologia wytapiania staliwa w linii piec łukowy – konwertor AOD zapewnia, jak wykazują wyniki badań czystości staliw, podstawę do produkcji odlewów bardzo wysokiej jakości.

*W publikacji przedstawiono wyniki badań uzyskane przy realizacji projektu POIR 01.01.02-00-0148/16-00, w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020. Działanie 1.1. Projekty B+R przedsiębiorstw. Poddziałanie 1.1.2. Prace B+R związane z wytworzeniem instalacji demonstracyjnej, pn. „Demonstracja technologii wytwarzania innowacyjnych odlewów stalowych przeznaczonych do zastosowania w ekstremalnych warunkach eksploatacji.*

refractory lining from chromite materials, from which C is not absorbed into the metal, the required low carbon content is easily obtained. The AOD process itself is also being optimised.

Heat treatment of low-alloy, high-alloy martensitic and corrosion-resistant cast steels, with a carbon content of less than 0.03% is, in addition to smelting technology, the second basic element of the demonstration technology of the production of castings with very high requirements for mechanical and functional properties of castings intended for extreme applications.

The cast steel smelting technology in the arc furnace – AOD converter line provides, as the results of cast steel purity tests show, the basis for the production of very high quality castings.

*The publication presents the research results obtained during the implementation of the POIR project 01.01.02-00-0148/16-00, as part of the Smart Growth Operational Programme 2014-2020. Measure 1.1. R&D projects of enterprises Sub-measure 1.1.2. R&D work related to manufacturing a pilot/demonstration installation “Demonstration of the production technology of innovative steel castings intended for use in extreme operating conditions.”*

#### LITERATURA ■ REFERENCES

- [1] J.W. Sadownik, A.V. Rabinowitch, J.A. Nefedov. Nowy kierunek pozapiecowej rafinacji staliwa w odlewnictwie. *Archives of Foundry/ Archiwum Odlewnictwa*, 2004, 4 (13), s. 201-204.
- [2] Y. Tang, T. Fabritius, J. Harkki. Mathematical modeling of the argon oxygen decarburization converter exhaust gas system at the reduction stage. *Applied Mathematical Modelling*, 2005, 29 (5), s. 497-514. doi.org/10.1016/j.apm.2004.09.011
- [3] J. Riipi, T. Fabritius, E.P. Heikkinen, P. Kupari, A. Kärnä. Behaviour of Nitrogen During AOD Process. *ISIJ International*, 2009, 49 (10), s. 1468-1473.
- [4] A.A.I. Andersson, A. Tillander, L.T.I. Jonsson, P.G. Jonsson. Investigating the Effect of Slag on Decarburization in AOD Converter Using a Fundamental Model. *Steel Research Int.*, 2013, 84 (2), s. 169-177. doi.org/10.1002/srin.201200143
- [5] S. Patro, J. Nayak, L.K. Singhal, S. Pal. Prediction of Nitrogen Content of Steel Melt during Stainless Steel Making Using AOD Converter. *Steel Research Int.*, 2017, 88 (5), 1600271. doi.org/10.1002/srin.201600271
- [6] C. Ta-uar. Optimization of the AOD Stainless Steel Processing Cost by the UTCASSystem. Materiał reklamowy firmy UHT (UVÁN HAGFORS TEKNOLOGI AB) [Online] [Dostęp 20.11.2017].
- [7] AOD converter and dedusting system brought into operation for SIJ Acroni, Slovenia. *MPT Intenational*, 2017 (4), s. 46.
- [8] New AOD Converter for SIJ Acroni. Primetals Technologies. [Online] Dostępny z: <https://www.primetals.com/press-media/metals-magazine/issue-01-2018/new-aod-converter-for-sij-acroni>. [Dostęp 23.11.2018].
- [9] I.F. Masterson, J.J. Feinstein, L. Stambaugh. Method for refining very small heats of molten metal. Patent US4708738A. 1.04.1986.
- [10] AKMETALL Metallurgical Industries Corp. Prezentacja. [niepublikowana].
- [11] Acieries Hachette & Driout (AHD). Materiał reklamowy. [Online] [Dostęp 20.12.2017].
- [12] UHT (UVÁN HAGFORS TEKNOLOGI AB). Uddeholm, Sweden. [Online] Dostępny z: [www.uht.se](http://www.uht.se). [Dostęp 16.10.2019].