

Bogdan ZDONEK, Ireneusz SZYPUŁA, Leszek BLACHA, Jerzy ŁABAJ, Jacek PIEPRZYCA, Jarosław MOYCHO, Lech BIELAŃSKI, Andrzej RZETELSKI, Stanisław BINEK, Piotr DUDKIEWICZ, Dariusz ZARZYCKI, Paweł REGULSKI, Włodzimierz KUTERA

## BADANIE PROCESU ODWĘGLANIA CIEKŁEJ STALI W KADZI Z ZASTOSOWANIEM PRZEDMUCHIWANIA ARGONEM I MIESZANINĄ TLENU I ARGONU

*Przedstawiono koncepcję i instalacje doświadczalne do odwęglania stali w kadzi o dużej pojemności (50 t) z przedmuchiwaniami kąpieli argonem przez hybrydową kształtkę gazoprzepuszczalną w dnie oraz w kadzi o małej pojemności (1 t) z wdmuchiwaniami do ciekłego metalu mieszaniny tlen – argon lancą od góry. Przeprowadzone na tych instalacjach próby doświadczalne wykazały dla pierwszej instalacji zmniejszenie zawartości węgla poniżej 0,02% i fosforu poniżej 0,003%, a w drugiej instalacji, możliwość elastycznego odwęglania kąpieli do zawartości węgla mniejszej niż 0,03%. Przedstawiono technologiczne scenariusze zastosowania zbadanych sposobów odwęglania stali w kadzi.*

*Słowa kluczowe:* kadź, odwęglanie, ciekła stal, tlen, argon, aktywność chemiczna

## INVESTIGATION OF LIQUID STEEL DECARBURISATION PROCESS IN A LADLE USING BLOWING WITH ARGON AND A MIXTURE OF OXYGEN AND ARGON

*The article presents the concept and experimental installations for decarburisation of steel in a large capacity ladle (50 t) with blowing the bath with argon through a gas-permeable hybrid fitting and in a small capacity ladle (1 t) with injection of an oxygen – argon mixture with a lance into liquid metal from above. For the first installation, the experimental tests showed a reduction in the carbon content below 0.02% and phosphorus below 0.003%, and in the second installation – the possibility of flexible decarburisation of the bath to a carbon content of less than 0.03%. Technological scenarios of the use of the investigated decarburisation methods of steel in a ladle are presented in the article.*

*Keywords:* ladle, decarburisation, liquid steel, oxygen, argon, chemical activity

### 1. WPROWADZENIE

Obecnie uwidacznia się rozwój stalowni do produkcji stali niskostopowych o małych zdolnościach produkcyjnych od 50 do 400 tys. ton stali rocznie, zwanych nano [1,2] lub mikro elektrostalowniami [3], ze szczególnym naciskiem na rozwój pieców indukcyjnych. W piecach tych nie ma możliwości bezpośredniego odwęglania kąpieli metalowej, ze względu na niebezpieczeństwo erozji wyłożenia ogniotrwałego tygla i możliwość awarii pieca na skutek wycieku metalu. Stąd też zwrócono uwagę na przeniesieniu zabiegu odwęglania stali do kadzi. W literaturze [1] jest doniesienie o przedmuchiwaniu kąpieli metalowej tlenem przez dno kadzi. Natomiast w odwęglaniu stali do bardzo małych zawartości węgla coraz większe uznanie zyskuje chemiczne, próżniowe odgazowanie [4] oparte w szczególności na procesie AOD. Prowadzone są badania w zakresie zastosowania zasady tego procesu do produkcji stali niskostopowej o bardzo niskiej zawartości węgla w kadzi metalur-

gicznej. Zasada procesu odwęglania jest następująca: wdmuchiwane przez porowatą kształtkę pęcherzyki argonu unoszą się w ciekłym metalu „pochłaniając” CO powstające z reakcji węgla z tlenem rozpuszczonym w metalu według znanych zależności termodynamicznych.

### 2. KONCEPCJA TECHNICZNA PRÓB ODWĘGLANIA

Wychodząc z założenia, że odwęglanie ciekłej stali w kadzi za pomocą przedmuchiwania gazem przez gazoprzepuszczalną kształtkę w dnie kadzi do bardzo niskich zawartości węgla (jak wynika z własnych doświadczeń technologicznych) będzie szczególnie przydatne w elektrostalowniach z piecami łukowymi o pojemnościach do kilkudziesięciu ton oraz że odwęglanie stali wytapianych w piecach indukcyjnych dotyczyć będzie małych pojemności. W tym celu wybrano dwie koncepcje prób odwęglania, a mianowicie:

Bogdan Zdonek (bzdonek@imz.pl), Ireneusz Szypuła – Instytut Metalurgii Żelaza im. St. Staszica  
Leszek Blacha, Jerzy Łabaj, Jacek Pieprzyca – Politechnika Śląska, Katowice  
Jarosław Moycho, Lech Bielański – Śląskie Towarzystwo Handlowe KUPIEC S.A., Mysłowice  
Andrzej Rzetelski – Firma Inżynieryjno Konsultingowa ARTECH Sc, Zabrze  
Stanisław Biniek, Piotr Dudkiewicz, Dariusz Zarzycki – Celsa – Huta Ostrowiec Sp. z o.o., Ostrowiec Św.  
Paweł Regulski, Włodzimierz Kutera – „SCATMAN” – Paweł Regulski, Warszawa

1. Odwęglanie ciekłej stali w kadzi o małej pojemności (gdzie nie ma miejsca na umieszczenie kształtki porowatej w dnie) za pomocą lancy zanurzonej z góry w ciekłej stali, złożonej z dwu koncentrycznych rur do wdmuchiwania mieszaniny tlenowo-argonowej: rury wewnętrznej – tlenu, a rury zewnętrznej – argonu. Do prób wybrano kadełko przemysłową o pojemności 2 ton stosowaną w odlewni. Przy spuście do niej 1 tony metalu jest spełniony warunek wolnej przestrzeni nad kąpielą.
2. Odwęglanie ciekłej stali wyświeżonej w piecu łukowym do zawartości węgla na poziomie  $0,05 \pm 0,09\%$  i odtlenionej wstępnie przy spuście dodatkami Al do bezpiecznego poziomu aktywności tlenu (nie powodującego wyrzutów metalu z kadzi na skutek reakcji węgla z tlenem rozpuszczonym w kąpeli), który wynosi około 300 ppm. Proces odwęglania wspomagany jest przedmuchiwaniami gazem obojętnym o dużym natężeniu przepływu przez gazoprzepuszczalną kształtkę porowatą w dnie kadzi.

Na podstawie dokonanych komputerowych obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem programu termodynamicznego FactSage z użyciem modułu obliczeniowego Equilib i baz danych: Fact PS, FT oxid i FS steel, opisanych szczegółowo w pracy [5] oraz badań modelowych intensywnego przedmuchiwania kąpeli gazem przez kształtkę porowatą w kadziach modelowych opisanych w pracy [6, 7], opracowano i opatentowano w formie zgłoszeń patentowych sposoby odwęglania stali w kadzi mieszanką gazową wprowadzaną przez dno [8] i z góry [9] i zbudowano prototypowe instalacje do prób realizowanych w skali przemysłowej, szczegółowo opisane w [10].

## 2.1. SPOSÓB I INSTALACJA DOŚWIADCZALNA DO ODWĘGLANIA STALI W KADZI ZA POMOCĄ MIESZANINY GAZÓW WPROWADZANEJ PRZEZ DNO

Zmniejszanie zawartości węgla w ciekłej stali odbywa się za pomocą mieszaniny tlenu z gazem obojętnym wdmuchiwanej poprzez gazoprzepuszczalną kształtkę

w dnie kadzi. Gaz obojętny wdmuchiwany przy odpowiednim natężeniu przepływu i w postaci niezmiernie drobnych pęcherzyków przyczynia się do porywania pęcherzyków CO i usuwania ich z kąpeli metalowej, zmniejszając ciśnienie cząstkowe CO nad kąpielą i podtrzymując reakcję węgla z tlenem rozpuszczonym w kąpeli.

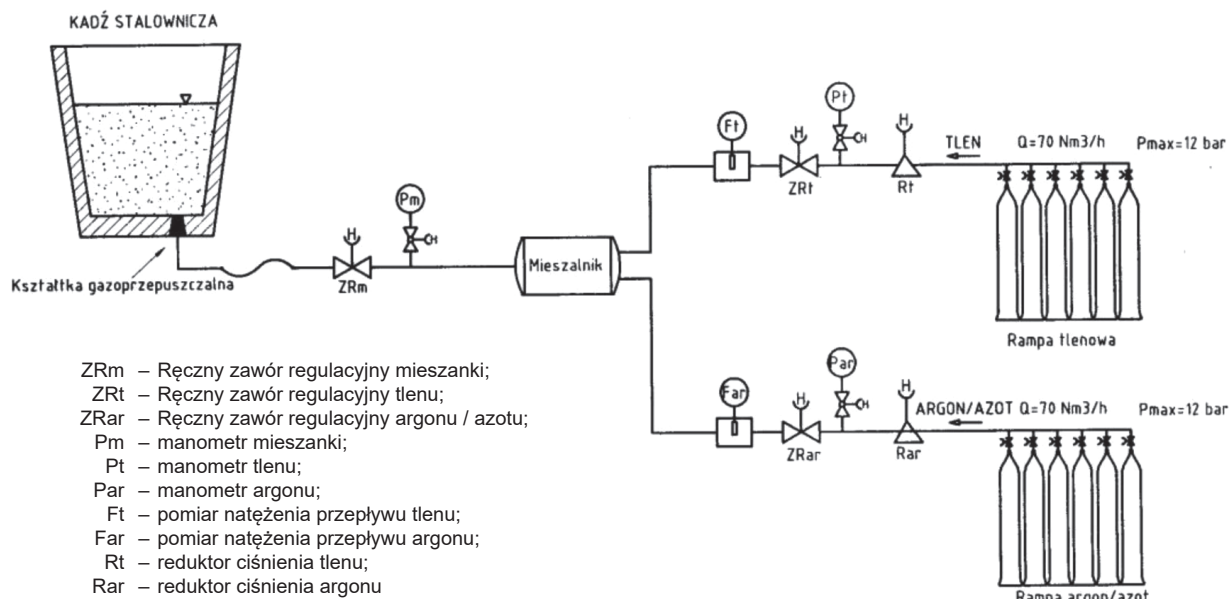
Na rysunku 1 przedstawiono schemat doświadczalnego układu doprowadzania mieszaniny tlenu z argonem do gazoprzepuszczalnego korka w dnie kadzi oraz urządzenie do sporządzania mieszaniny gazowej tzw. komorę mieszania (mieszalnik).

Mieszalnik zasilany jest z osobnych źródeł doprowadzenia tlenu i argonu. Wytwarza się w nim w sposób ręczny lub automatycznie mieszaninę tlenu z argonem przy różnych stosunkach objętościowych tych gazów. Do odwęglania kąpeli metalowej charakteryzującej się dużą aktywnością tlenu, spuszczonej z pieca metalurgicznego do kadzi można również stosować wdmuchiwanie samego argonu z dużym natężeniem przepływu przez odpowiednią kształtkę gazoprzepuszczalną.

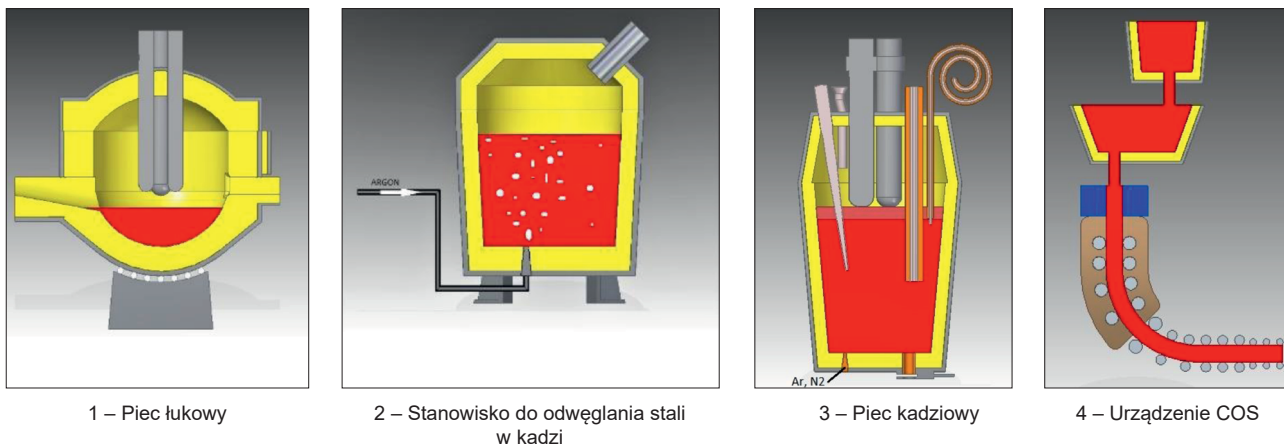
Doświadczalna instalacja do odwęglania stali w kadzi 50 t z wdmuchiwaniami argonu z dużym natężeniem przepływu przez gazoprzepuszczalny korek w dnie zbudowana została w stalowni Zakładu Wyrobów Kutych Celsa – Huta Ostrowiec Sp. z o.o. Na rysunku 2 przedstawiono schemat linii technologicznej do wytapiania i odlewania stali z usytuowaniem stanowiska do odwęglania stali w kadzi na stanowisku pieca kadziowego.

Instalacja składa się z kadzi o wyłożeniu zasadowym ze zwiększoną strefą żużla i wolną burtą, wyposażoną w specjalną hybrydową porowatą kształtkę gazoprzepuszczalną typu RHI o dużej przepuszczalności, przedstawioną schematycznie na rys. 3.

Kadełko doświadczalne w czasie prób odwęglania umieszczona była na stanowisku pieca kadziowego. Argon, zarówno przed jak i po procesie odwęglania (przy natężeniu przepływu  $2 \div 5 \text{ Nm}^3/\text{h}$  i  $75 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) doprowadzany był z instalacji przystosowanej do dużych jak i niewielkich natężeń przepływu.

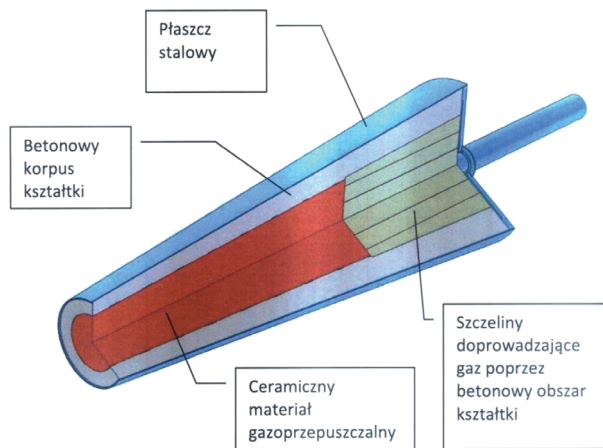


Rys. 1. Schemat układu doprowadzania mieszaniny tlenu i argonu do gazoprzepuszczalnego korka w dnie kadzi  
 Fig. 1. System for supplying the mixture of oxygen and argon to the gas-permeable plug at the bottom of the ladle



Rys. 2. Schemat linii technologicznej wytapiania i rafinacji pozapiecowej stali ze stanowiskiem do odwęglania w kadzi za pomocą przedmuchiwanego argonem przez gazoprzepuszczalną kształtkę w dnie kadzi

Fig. 2. Technological smelting and secondary steel refining line with a ladle decarburisation station with argon blowing through a gas-permeable fitting at the bottom of the ladle



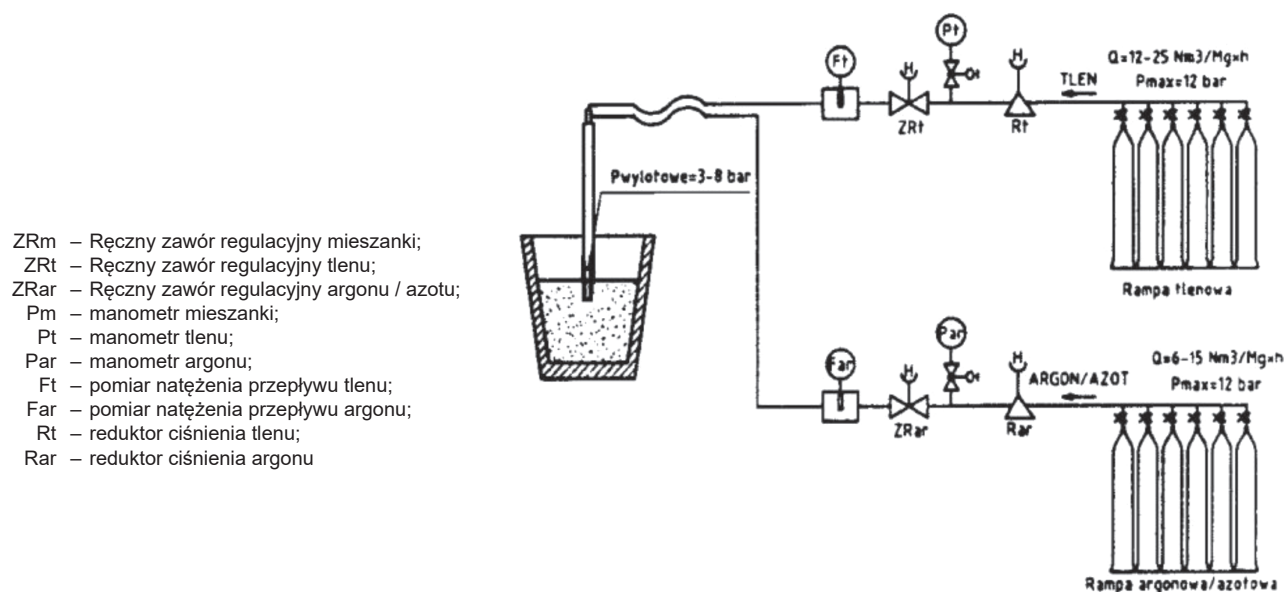
Rys. 3. Kształtka gazoprzepuszczalna do przedmuchiwania kąpieli stalowej gazem przy dużym natężeniu przepływu

Fig. 3. Gas-permeable fitting for blowing steel bath with gas at a high flow rate

## 2.2. SPOSÓB I INSTALACJA DOŚWIADCZALNA DO ODWĘGLANIA STALI W KADZI MIESZANINĄ GAZOWĄ WPROWADZANĄ DO CIEKŁEGO METALU LANCĄ OD GÓRY

Do zmniejszania stężenia węgla w ciekłej stali zastosowano mieszaninę tlenu z argonem wprowadzając ją z góry, za pomocą zanurzonej lancy składającej się z dwu współśrodkowych rur, wewnętrznej – do tlenu i zewnętrznej – do argonu. Tlen wdmuchiwany do kąpieli powoduje utlenianie rozpuszczonego w niej węgla, natomiast argon wpływa na zmniejszenie ciśnienia cząstkowego tlenu węgla, ułatwiając przebieg reakcji odwęglania oraz obniżając temperaturę ciekłego metalu w obszarze wypływu gazów z lancy i chroniąc ją przed nadmiernym zużyciem.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat doprowadzenia tlenu i argonu do lancy umieszczonej w ciekłej stali w kadzi.



- ZRm – Ręczny zawór regulacyjny mieszanki;
- ZRt – Ręczny zawór regulacyjny tlenu;
- ZRar – Ręczny zawór regulacyjny argonu / azotu;
- Pm – manometr mieszanki;
- Pt – manometr tlenu;
- Par – manometr argonu;
- Ft – pomiar natężenia przepływu tlenu;
- Far – pomiar natężenia przepływu argonu;
- Rt – reduktor ciśnienia tlenu;
- Rar – reduktor ciśnienia argonu

Rys. 4. Schemat układu doprowadzania tlenu i argonu (lub azotu) do lancy przez którą wdmuchiwane są do kąpieli stalowej w kadzi

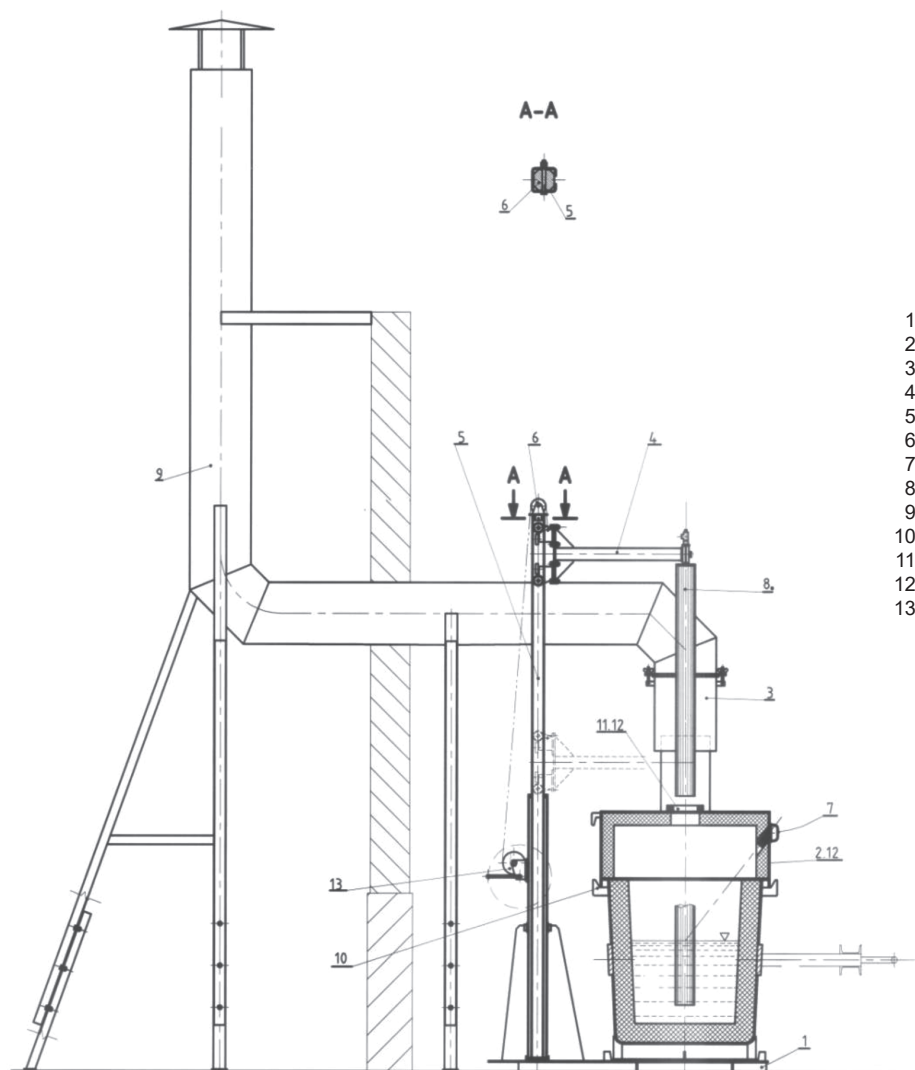
Fig. 4. Oxygen and argon (or nitrogen) supply system to the lance through which they are blown into steel bath in the ladle

Jednostkowe natężenie przepływu gazu obojętnego wynosi od 6 do 20 Nm<sup>3</sup>/h, a tlenu od 0 do 45 Nm<sup>3</sup>/h, przy nadciśnieniu dopływu gazu od 0,3 do 0,8 MPa. Proces wdmuchiwania odbywa się wieloetapowo przy znanych natężeniach przepływu gazów i różnych stosunkach objętościowych tlenu do argonu. Głębokość zanurzenia lancy w metalu wynosi co najmniej 250 mm.

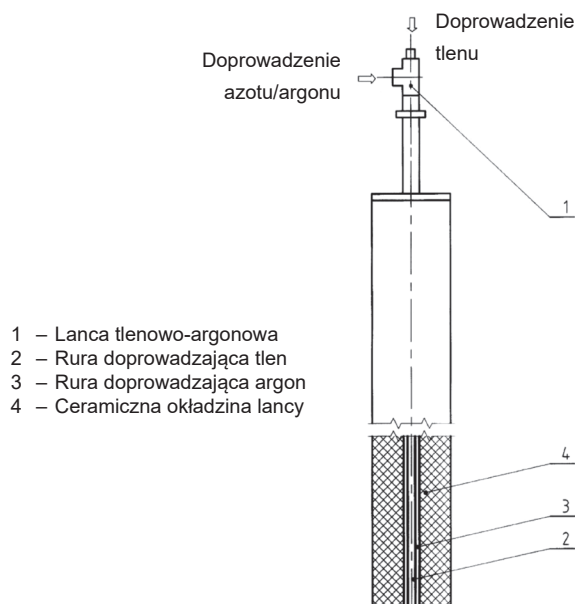
### 2.2.1. Przykład doświadczalnej instalacji do odweglania stali za pomocą lancy wprowadzanej z góry do kadzi o pojemności 1,0÷1,3 t

Instalację doświadczalną zbudowano w Odlewni Scatman (Budy Mszczonowskie) wyposażonej w piece indukcyjne do topienia staliwa w gatunkach zarówno niskostopowych jak i wysokostopowych. Do prób wykorzystano kadełko o pojemności nominalnej 2 ton, zwiększając wysokość wolnej burty do ponad 400 mm i pogrubiając wysokoglinkowe wyłożenie ogniotrwałe z 85 do 125 mm, przez co uzyskano pojemność kadzi wynoszącą co najmniej 1 tonę. Rysunek 5 przedstawia schemat tej instalacji doświadczalnej.

Na rysunku 6 przedstawiono schemat lancy do wdmuchiwania mieszaniny tlenowo-argonowej do kąpiel metalowej w kadzi o pojemności 1 tony.



Rys. 5. Schemat instalacji doświadczalnej  
Fig. 5. Experimental installation



- 1 – Lancy tlenowo-argonowa
- 2 – Rura doprowadzająca tlen
- 3 – Rura doprowadzająca argon
- 4 – Ceramiczna okładzina lancy

Rys. 6. Schemat lancy zanurzonej z góry do wdmuchiwania mieszaniny tlen-argon do kąpiel metalowej w kadzi

Fig. 6. Lance submerged from above for blowing oxygen-argon mixture into metal bath in the ladle

- 1 – Podstawa instalacji
- 2 – Pokrywa kadzi
- 3 – Króciec uszczelniający odciąg spalin
- 4 – Ramię nośne lancy
- 5 – Słup nośny lancy
- 6 – Krążek linowy do podnoszenia lancy
- 7 – Wziernik
- 8 – Lancy
- 9 – Komin odciagu spalin
- 10 – Wspornik pokrywy
- 11 – Prowadnice lancy
- 12 – Wyłożenie ogniotrwałe pokrywy
- 13 – Krążek linowy podnoszenia lancy



### 3. PRZEPROWADZENIE PRÓB DOŚWIADCZALNYCH

#### 3.1. PRÓBY ODWĘGLANIA STALI W DOŚWIADCZALNEJ INSTALACJI Z KADZIĄ 50 t Z WDMUCHIWANIEM ARGONU PRZEZ HYBRYDOWĄ KSZTAŁTKĘ GAZOPRZEPUSZCZALNĄ W DNIIE KADZI

Stal wytapiano w piecu łukowym o pojemności 65 t, z wsadu z udziałem złomu z kordu odzyskanego z przeróbki zużytych opon samochodowych. Masa wytopu wynosiła 50 ton. Wytopy spuszczano do kadzi i przewożono suwnicą na stanowisko pieca kadziowego. Po skorygowaniu temperatury do wymaganego minimum 1580°C rozpoczęto przedmuchiwanie utlenionej kąpieli argonem przez hybrydową kształtkę porowatą z maksymalnie dużym natężeniem przepływu argonu (75 Nm<sup>3</sup>/h). Po zakończeniu odwęglania wytop rafinowano i korygowano jego skład chemiczny w piecu kadziowym i przewożono do odlewania na urządzenie COS. Aktywność tlenu w stali przed rozpoczęciem odwęglania wynosiła minimum 200 ppm, czas przedmuchiwania wynosił od 10 do 15 minut. Do kadzi podczas spustu dodawano CaO w ilości 10 kg/t stali i boksyt – 1 kg/t stali. Przebieg i wyniki prób doświadczalnych opisano szczegółowo w raporcie [11].

W tabeli 1 zestawiono wyniki odwęglania i odfosforowania kąpieli metalowej w kadzi z wdmuchiwaniami argonu przez hybrydową kształtkę gazoprzepuszczalną.

Z tabeli tej wynika, że można skutecznie zmniejszyć zawartość węgla w ciekłej stali z 0,05÷0,07% (przed spustem z pieca) do bardzo niskiej zawartości, mniejszej niż 0,02% w stosunkowo krótkim czasie 10÷15 minut, wdmuchując argon przy natężeniu przepływu co najmniej 70 Nm<sup>3</sup>/t. Spadek temperatury podczas przedmuchiwania wynosił od 3,8 do 4,4°C/min. Równocześnie ze spadkiem zawartości węgla następował spadek zawartości fosforu w stali nawet do 0,003%, stwarzając dodatkową korzyść, przy wytapianiu stali z wymaganymi bardzo niskimi zawartościami tego składnika. Zawartość krzemu w kąpieli metalowej podczas odwęglania była bardzo mała, bliska zero.

W tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny żużla przed i po procesie odwęglania.

Zwiększenie zawartości FeO i MnO w żużlu po procesie odwęglania wskazuje na silnie utleniający charakter żużla, sprzyjający przebiegowi reakcji odwęglania. Intensywne wdmuchiwanie argonu przyczynia się do utlenienia zarówno żelaza, jak i manganu tlenem zawartym zarówno w metalu, jak i w powietrzu wciągającym do metalu na skutek burzliwego mieszania kąpieli metalowej z żużlem. Wzrost zawartości P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> w tym żużlu przy dużej zasadowości żużla i silnym mieszanin przy temperaturze kąpieli metalowej w zakresie 1580÷1600°C tworzy sprzyjające warunki do głębokiego odfosforowania kąpieli. Żużel ten należy niezwłocznie po zakończeniu odwęglania usunąć i przed dalszym procesem pozapiecowej rafinacji naprowadzić nowy.

Wzrost zawartości MgO w żużlu po procesie odwęglania wskazuje na zużycie wyłożenia ogniotrwałego ścian kadzi na skutek oddziaływania strumienia przedmuchiwania kąpieli argonem. Wizualna obserwacja wyłożenia kadzi po przeprowadzeniu prób odwęglania nie wykazywała widocznych oznak wymywania wymurówki kadzi.

#### 3.2. PRÓBY ODWĘGLANIA STALI W DOŚWIADCZALNEJ INSTALACJI DO ODWĘGLANIA KĄPIELI LANCĄ WPROWADZONĄ Z GÓRY DO KADZI O POJEMNOŚCI 1,0 t

Ciekłą stal wytapiano w piecu indukcyjnym o pojemności tygla od 1,0 do 1,3 t. Masa wytopu wynosiła około 1 tony. Wytop spuszczano do kadzi, a kadź z metalem przewożono wózkami podnośnikowymi na stanowisko doświadczalne do odwęglania stali. Po ustawieniu kadzi na podeście, przykryciu pokrywą, podłączeniu króćca do układu odciągu spalin i wprowadzeniu lancy do kadzi przez otwór w pokrywie rozpoczynano wdmuchiwanie tlenu środkową rurą i argonu zewnętrzną rurą.

Rysunek 7 przedstawia widok stanowiska doświadczalnego do wdmuchiwania lancy tlenu i argonu.

Podczas wdmuchiwania zmieniano ręcznie stosunek intensywności przepływu tlenu do argonu za pomocą

Tabela 1. Wyniki odwęglania i odfosforowania stali w kadzi z wdmuchiwaniami argonu przez hybrydową kształtkę porowatą

Table 1. Results of decarburisation and dephosphorisation of steel in a ladle with argon blowing through a hybrid porous fitting

Numer próby	Zawartość pierwiastka, [%]				Zmiana zawartości, [%]		Stopień zmniejszenia zawartości, [%]		Czas przedmuchiwania [min]
	przed	po	przed	po	C	P	C	P	
	C		P						
1	0,055	0,056	0,005	0,006	0	0	0	0	8
2	0,053	0,035	0,008	0,003	0,018	0,005	34,0	62,5	10
3	0,042	0,028	0,008	0,004	0,014	0,004	33,3	50,0	16
4	0,026	0,012	0,007	0,007	0,014	-0	53,8	-	15

Tabela 2. Skład chemiczny żużla przed i po procesie odwęglania ciekłej stali w kadzi 50 t

Table 2. Chemical composition of slag before and after liquid steel decarburisation in a 50 t ladle

Próbka żużla	Zawartość składników, [%]									Zasadowość CaO / SiO <sub>2</sub>
	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	
Przed procesem odwęglania	53,8	9,42	7,47	0,97	14,13	8,53	0,13	0,47	<0,01	5,71
Po procesie odwęglania	41,5	8,79	16,41	1,71	10,01	10,35	0,37	0,78	<0,01	4,72



Rys. 7. Widok stanowiska doświadczalnego do wdmuchiwania lancą mieszanki tlen - argon

Fig. 7. Experimental station for blowing oxygen - argon mixture with a lance

regulatorów przepływu. Po zakończeniu odwęglania wytop odlewano do form na odlewy bloków.

W tabeli 3 zestawiono główne parametry prób odwęglania stali w kadzi 1,0 t poprzez lancę zanurzoną z góry.

Wdmuchiwanie tlenu i argonu prowadzono w 5÷6 etapach przy zmieniającym się stosunku tlenu do argonu, zarówno objętościowym (natężenie przepływu gazów), jak i w odniesieniu do prędkości wypływu gazów z lancy.

Rysunki 8 i 9 przedstawiają kolejno przykładowe przebiegi zmian natężeń przepływów tlenu i argonu w procesie odwęglania oraz zależność prędkości liniowej wypływu tlenu i argonu od natężeń przepływu tych gazów w próbie nr 3.

Tabela 4 przedstawia zmiany zawartości podstawowych pierwiastków w kąpeli metalowej, temperatury oraz czasu wdmuchiwania tlenu i argonu przez lancę w próbach odwęglania.

W tabeli 5 zestawiono natomiast główne technologiczne parametry procesu odwęglania.

Tabela 3. Parametry prób odwęglania kąpeli metalowej w kadzi 1,0 t lancą z góry

Table 3. Parameters of decarburisation of metal bath in a 1.0 t ladle with a lance from above

Numer próby	Etap	Gaz	Czas wdmuchiwania [min]	Natężenie przepływu Q [Nm <sup>3</sup> /h]	Prędkość przepływu V <sub>1</sub> [m/s]	Stosunek Q <sub>O<sub>2</sub></sub> / Q <sub>Ar</sub>	Stosunek V <sub>1O<sub>2</sub></sub> / V <sub>1Ar</sub>
1	1	O <sub>2</sub>	1	3	3,67 <sup>1)</sup>	1 : 1	1 : 3
		Ar		3	10,38 <sup>2)</sup>		
	2	O <sub>2</sub>	3	45	55,0 <sup>1)</sup>	4,5 : 1	1,5 : 1
		Ar		10	35,0 <sup>2)</sup>		
	3	O <sub>2</sub>	2	67	81,9 <sup>1)</sup>	3 : 1	1 : 1
		Ar		21	72,5 <sup>2)</sup>		
	4	O <sub>2</sub>	1	35	42,7 <sup>1)</sup>	2 : 1	1 : 1
		Ar		15	52,5 <sup>2)</sup>		
	5	O <sub>2</sub>	0	8	9,69 <sup>1)</sup>	1 : 1	1 : 3
		Ar		8	27,5 <sup>2)</sup>		
2	1	O <sub>2</sub>	1	8	6,11 <sup>3)</sup>	1 : 1	1 : 2,5
		Ar		8	15,71 <sup>4)</sup>		
	2	O <sub>2</sub>	3	80	61,1 <sup>3)</sup>	8 : 1	3 : 1
		Ar		10	20,0 <sup>4)</sup>		
	3	O <sub>2</sub>	3	60	46,3 <sup>3)</sup>	6 : 1	2 : 1
		Ar		10	20,0 <sup>4)</sup>		
	4	O <sub>2</sub>	3	40	30,5 <sup>3)</sup>	2 : 1	1 : 1,5
		Ar		20	40,0 <sup>4)</sup>		
	5	O <sub>2</sub>	1	10	7,78 <sup>3)</sup>	1 : 1	1 : 2
		Ar		10	20,0 <sup>4)</sup>		
3	1	O <sub>2</sub>	1	8	6,11 <sup>3)</sup>	1 : 1	1 : 2
		Ar		8	15,71 <sup>4)</sup>		
	2	O <sub>2</sub>	5	90	69,4 <sup>3)</sup>	9 : 1	3 : 1
		Ar		10	20,0 <sup>4)</sup>		
	3	O <sub>2</sub>	3	60	46,3 <sup>3)</sup>	6 : 1	2 : 1
		Ar		10	20,0 <sup>4)</sup>		
	4	O <sub>2</sub>	2	40	30,5 <sup>3)</sup>	2 : 1	1 : 1
		Ar		20	40,0 <sup>4)</sup>		
	5	O <sub>2</sub>	2	20	15,3 <sup>3)</sup>	1 : 1	1 : 2
		Ar		20	40,0 <sup>4)</sup>		
	6	O <sub>2</sub>	1	10	7,78 <sup>3)</sup>	1 : 2	1 : 5
		Ar		20	40,0 <sup>4)</sup>		

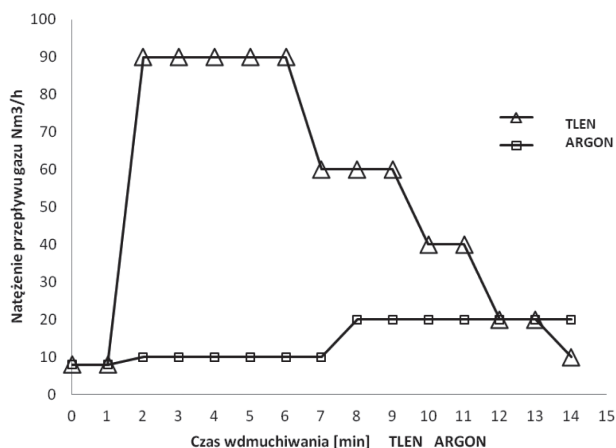
Uwagi:

1) średnica i grubość ścianek rury wewnętrznej (tlenowej), mm: 17 × 1,8

2) średnica i grubość ścianki rury zewnętrznej (argonowej), mm: 26,9 × 2

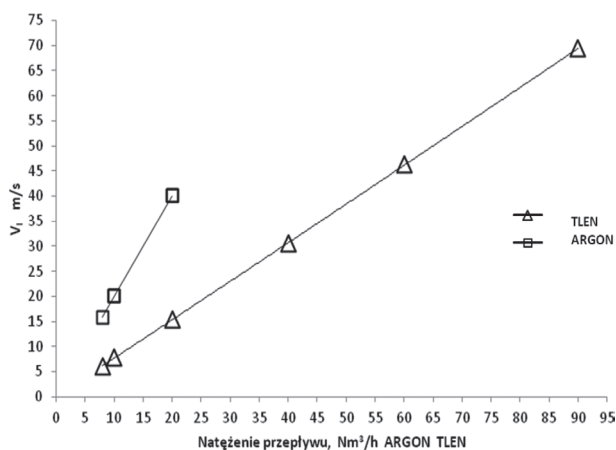
3) średnica i grubość ścianki rury wewnętrznej (tlenowej), mm: 21,3 × 2

4) średnica i grubość ścianki rury zewnętrznej (argonowej), mm: 33,7 × 2,6



Rys. 8. Zmiana natężenia przepływu gazów w procesie odwęglania, próba 3

Fig. 8. Change in the gas flow rate in the decarburisation process, test 3



Rys. 9. Zależność prędkości liniowej gazów od natężenia przepływu, próba nr 3

Fig. 9. Dependence of linear velocity of gases on the flow rate, test No. 3

Zamieszczone w tabeli 4 wyniki pierwszej próby wykazują brak odwęglania kąpieli metalowej. Analiza parametrów zawartych w tabeli 3 doprowadziła do zwiększenia natężeń przepływu tlenu i argonu oraz do zwiększenia średnic rury wewnętrznej tlenowej i rury zewnętrznej argonowej. Wprowadzono również dodatkową rurę zewnętrzną wzmacniającą konstrukcję lancy. Na rury nałożono ceramiczną osłonę z wysokoglinkowych kształtek (rurki żerdziowe). W trakcie prób następowało zużycie lancy na głębokość zanurzenia w żużlu i w metalu, około 500 mm. Po każdej próbie uzupełniano tę część do pierwotnej długości poprzez dospawanie odpowiednich rur i uzupełnienie wyłożenia ceramicznego. Rysunki 10 i 11 przedstawiają kolejno widok lancy po procesie dmuchania oraz widok lancy



Rys. 10. Widok lancy po procesie dmuchania  
Fig. 10. Lance after blowing

Tabela 4. Zmiana zawartości podstawowych pierwiastków w kąpieli w zależności od temperatury i czasu dmuchania tlenu i argonu przez lancę w próbach odwęglania w kadzi lancą tlenowo-argonową

Table 4. Change in the content of basic elements in the bath depending on the temperature and time of blowing oxygen and argon through the lance in ladle decarburisation tests with an oxygen-argon lance

Numer próby	Zawartość pierwiastka, [%]						Temperatura			Czas dmuchania [min]
	C		Si		Mn		Ciekłej stali [°C]			
	początek	koniec	początek	koniec	początek	koniec	piec	kadź	koniec	
1	0,65	0,65	0,33	0,17	0,67	0,58	1759	-	1545	6
2	0,76	0,30	0,52	0,07	1,27	0,40	1743	-	1652	9
3	0,41	0,03	0,32	0,01	0,27	0,02	1744	1675	1602	12

Tabela 5. Parametry technologiczne procesu odwęglania

Table 5. Parameters of decarburisation process

Nr próby	Szybkość utleniania pierwiastków [% /min]			Spadek temp. w procesie odwęglania [°C / min]	Sprawność odwęglania <sup>2)</sup> [%]	Skuteczność odwęglania <sup>1)</sup> [%]	Zużycie gazów do odwęglania [Nm <sup>3</sup> ]		Stosunek zużycia O <sub>2</sub> / Ar
	C	Si	Mn				Tlen	Argon	
1	0	0,027	0,015	21,7	20	0	7,17	3,62	1,98
2	0,05	0,05	0,097	2,6	54	60	11,23	2,89	3,89
3	0,03	0,027	0,021	6,1	26	92	14,03	10,03	1,40

Uwagi:

1) Skuteczność odwęglania =  $[(C_p - C_k) / C_p] \cdot 100\%$ ; gdzie:  $C_p$  – zawartość węgla w kąpieli metalowej przed odwęglaniem, %  
 $C_k$  – zawartość węgla w kąpieli metalowej po odwęglaniu, %

2) Sprawność odwęglania =  $(O_{2\text{teor}} / O_{2\text{rzecz}}) \cdot 100\%$ , gdzie:  $O_{2\text{teor}}$  – teoretyczne zapotrzebowanie tlenu do odwęglania, Nm<sup>3</sup>  
 $O_{2\text{rzecz}}$  – rzeczywiste zużycie tlenu do odwęglania, Nm<sup>3</sup>



po modyfikacji tzn. dospawania rur o większych średnicach, jeszcze przed nałożeniem ceramicznej kształtki.

Celem drugiej próby było zmniejszenie zawartości węgla w kąpeli metalowej do wymaganej średniej zawartości węgla ( $C \geq 0,30\%$ ) i wyświeżenie co najmniej  $0,4\%$  C. W trzeciej próbie celem było odwęglanie kąpeli metalowej zawierającej ok.  $0,40\%$  C, ale do jak najmniejszej zawartości węgla i uzyskanie kontroli temperatury



**Rys. 11.** Widok lancy po modyfikacji (dopasowaniu rur o większych średnicach)

**Fig. 11.** Lance after modification (fitting pipes with larger diameters)

ry w kąpeli w procesie odwęglania poprzez zwiększony przepływ argonu w końcowym etapie wdmuchiwania.

Wyniki zmian zawartości węgla na początku i końcu procesu wdmuchiwania zamieszczone w tabeli 4 wskazują, że cele zostały osiągnięte. W drugiej próbie zmniejszono zawartość węgla o  $0,46\%$ , z wartości początkowej  $0,76\%$  do końcowej  $0,30\%$  w czasie wdmuchiwania 9 minut, kończąc proces odwęglania przy temperaturze  $1652^{\circ}\text{C}$ , wystarczającej do uzupełnienia dodatków stopowych, rafinacji kąpeli w kadzi za pomocą przedmuchiwania argonem i dostosowanie temperatury do zalewania form. W trzeciej próbie osiągnięto również zamierzony cel, jednakże przy dłuższym czasie wdmuchiwania wynoszącym 12 minut.

Zwiększenie natężenia przepływu argonu w ostatnim etapie odwęglania wpłynęło na zmniejszenie temperatury kąpeli do  $1602^{\circ}\text{C}$ . Wskazuje to, że przez dobranie natężeń przepływów i stosunku tlenu do argonu oraz czasu wdmuchiwania można elastycznie regulować zawartość węgla i temperaturę ciekłego metalu po odwęglaniu.

Wyniki zamieszczone w tabeli 5 wyraźnie wskazują, że przy odwęglaniu kąpeli o tę samą ilość węgla

( $0,40\%$ ), odwęglanie z większej zawartości węgla od średniej ( $C = 0,30\%$ ) przebiega z większą prędkością ( $0,05\%$  C/min), przy mniejszym zużyciu tlenu i argonu i z większą sprawnością odwęglania ( $54\%$ ). Przy dążeniu do uzyskania jak najmniejszych zawartości węgla i rozpoczynaniu odwęglania z zawartości węgla w średnim przedziale, szybkość wypalania jest mniejsza ( $0,03\%$  C/min), przy mniejszej sprawności odwęglania ( $26\%$ ), większym zużyciu tlenu i argonu, jednakże z dużą skutecznością odwęglania, bo wynoszącej aż  $92\%$ . Skuteczność odwęglania wyraźnie rośnie ze wzrostem ilości wdmuchiwanego tlenu jak i argonu. Zgadza się to z krytyczną zawartością węgla [12] wynoszącą około  $0,30\%$ , przy której zmienia się mechanizm szybkości przenoszenia masy. Przy dużej zawartości węgla w kąpeli metalowej siła napędowa przenoszenia masy węgla wystarcza do redukcji całego utworzonego FeO, a szybkość wypalania węgla ograniczona jest masowym natężeniem przepływu tlenu. Przy niskiej zawartości węgla nie cała zawartość FeO zostaje zredukowana, przez co rośnie zawartość FeO w żużlu. Zawartość FeO w żużlu po odwęglaniu w 3 próbie wynosiła  $33,75\%$  przy uzyskanej bardzo niskiej zawartości węgla w kąpeli metalowej, wynoszącej  $0,03\%$ . Próby wykazały bardzo dużą elastyczność w prowadzeniu procesu odwęglania kąpeli metalowej w kadzi. Proces odwęglania kąpeli do najmniejszych zawartości węgla trwał kilkanaście minut. Krótkie czasy odwęglania kąpeli metalowej w kadzi mają bardzo ważne znaczenie dla żywotności wyłożenia ogniotrwałego kadzi. Im krótszy będzie czas dmuchania mieszaniny argon-tlen tym mniejsze będzie zużycie ogniotrwałego wyłożenia kadzi.

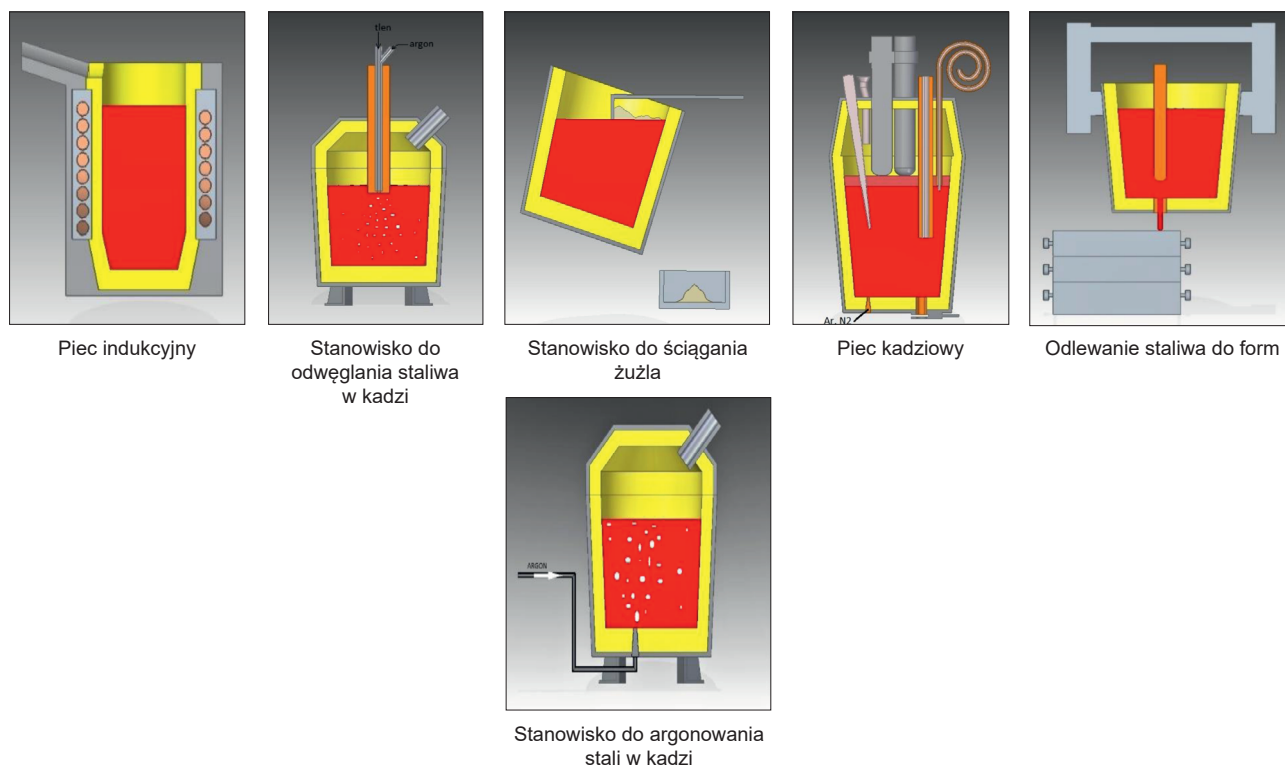
Rysunek 12 przedstawia stan wyłożenia ogniotrwałego kadzi po 3 próbach. Widać wyraźnie strefę metalu, żużła oraz strefę wolnej burty zanieczyszczoną w niewielkim stopniu drobnymi wyrzutami żużła i metalu podczas odwęglania. W czasie każdej próby następowała wyraźna erozja materiałów ogniotrwałych w strefie żużła, na głębokość około  $10\text{ mm}$ .



**Rys. 12.** Widok wyłożenia ogniotrwałego kadzi po 3 próbach

**Fig. 12.** Refractory lining of the ladle after 3 tests





Rys. 13. Linia technologiczna wytapiania, odwęglania kadzi i rafinacji stali niskostopowych i niskowęglowych  
 Fig. 13. Technological line for smelting, decarburisation of ladles, and refining low-alloy and low-carbon steels

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone próby doświadczalne na doświadczalnych instalacjach do odwęglania ciekłego metalu w kadzi wykazały, że

1. Stosując przedmuchiwanie kąpieli metalowej nieodtlenionej lub częściowo odtlenionej, argonem z dużym natężeniem przepływu przez hybrydową kształtkę gazoprzepuszczalną umieszczoną w dnie kadzi, można znacząco zmniejszyć zawartość węgla w stali i umożliwić produkcję stali z zawartością węgla poniżej 0,05% bez potrzeby odwęglania stali w próżni. Można również znacząco zmniejszyć stężenie fosforu w stali, nawet do zawartości mniejszej niż 0,002%, co ma istotne znaczenie przy wytwarzaniu stali o bardzo dużej czystości metalurgicznej, np. przy produkcji wlewków do kucia o dużej masie, czy stali charakteryzujących się wymaganą udarnością przy bardzo niskich temperaturach pracy (poniżej minus 60°C). Rysunek 2 przedstawia schematycznie linię technologiczną do wytapiania i odwęglania w kadzi oraz rafinacji pozapiecowej stali niskostopowych z bardzo niskimi zawartościami węgla o dużej czystości przeznaczonej zarówno do odlewania ciągłego jak i do wlewnic.
2. Odwęglanie kąpieli metalowej w kadzi, poprzez wdmuchiwanie lancą od góry mieszaniny tlenowo-argonowej, przez rurę wewnętrzną tlenu i przez

rurę współśrodkową zewnętrzną argonu, umożliwia elastyczne odwęglanie kąpieli z dowolnych początkowych zawartości węgla do wymaganych (odwęglanie przerywane), jak również odwęglanie do niskich zawartości węgla, przy utrzymywaniu wymaganej temperatury kąpieli metalowej.

3. Odwęglanie stali lancą w kadzi może być przydatne przy wytapianiu stali wysokiej jakości w piecu indukcyjnym, w którym nie można odwęgląć kąpieli metalowej bezpośrednio w tyglu pieca. Sposób ten wymaga ściągnięcia żużła i naprowadzenie nowego oraz dalszej rafinacji oraz korekty składu chemicznego stali w kadzi, za pomocą dalszego argonowania (gatunki stali niskostopowych) lub obróbki w piecu kadziowym. W szczególnych przypadkach stal można rafinować wlewając ją z powrotem do pieca indukcyjnego, w celu dokonania korekty składu chemicznego i temperatury. Rysunek 13 przedstawia schematycznie linię technologiczną do wytapiania w piecu indukcyjnym, odwęglania w kadzi, rafinacji pozapiecowej stali niskostopowych niskowęglowych na odlewy.

*Wyniki zamieszczone w publikacji uzyskano w ramach badań realizowanych w programie GEKON – Generator Koncepcji Ekologicznych Umowa nr GEKON2/05/2688809/19/2015 współfinansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.*

## LITERATURA

- [1] T. Klein, U. Wilhelm, *Nano Mill technology – an extra – low capex solution for local steel supply*, „MPT International” (2) (2013) s. 68-74.
- [2] /-/ Danieli nano – mill technology at Al – Mamool, Iraq; Danieli News n.169, January 2014, Danieli Group; 22741/DL/IMŻ.
- [3] R. Bode, W. Schmitz, D. Trauzeddel, *Coreless induction in micro mills*, www.steeltimesint.com; March 2016; s. 21-25.
- [4] T. Inomoto, M. Matsuo, M. Yano, *Evaluation of the chemical Vacuum Effect in Decarburization Treatment by Argon Injected Steel under Normal Atmosphere*, „ISIJ International”, 55 (4) (2015) s. 723-726.
- [5] B. Zdonek, P. Różański, I. Szypuła, *Opracowanie elementów modeli matematycznych przeznaczonych do symulacji procesu odweglania tlenem gazowym roztopionego złomu stalowego z recyklingu opon samochodowych w kadzi odlewniczej*, Sprawozdanie IMŻ nr PI-0007-01 (2015) nieopublikowane.
- [6] J. Pieprzyca, T. Merder, M. Warzecha, P. Warzecha, *Modelowanie hybrydowe zjawisk hydrodynamicznych zachodzących w kadzi do odweglania i chemicznego dogrzewania kąpeli metalowej tlenem gazowym*, Sprawozdanie Politechniki Śląskiej nr 11/020/GEK15/0031-02 (2016) nieopublikowane.
- [7] J. Pieprzyca, T. Merder, M. Warzecha, B. Zdonek, L. Bielański, *Przedmuchiwanie ciekłej stali w kadzi przy dużych natężeniach przepływu gazu – modelowanie fizyczne*, „Hutnik – Wiadomości Hutnicze”, (11) (2016), s. 498-500.
- [8] Zgłoszenie patentowe nr P.422668, *Sposób odweglania stali (w kadzi mieszaniną gazową wprowadzoną przez dno)*.
- [9] Zgłoszenie patentowe nr P.422666, *Sposób odweglania stali (w kadzi mieszaniną gazową wprowadzaną z góry)*.
- [10] B. Zdonek, I. Szypuła, M. Miczka, *Budowa doświadczalnej kadzi do odweglania i chemicznego dogrzewania kąpeli metalowej tlenem gazowym*, Sprawozdanie IMŻ nr PI-0007-03 (2017) nieopublikowane.
- [11] B. Zdonek, I. Szypuła, W. Wittchen, D. Woźniak, A. Żak, *Próby doświadczalne odweglania kąpeli metalowej gazowym tlenem w doświadczalnej kadzi*, Sprawozdanie IMŻ nr PI-0007-04 (2017) nieopublikowane.
- [12] H. Matsuura, Ch.P. Manning, R.A. Fortes, R.J. Fruehan, *Development of a Decarburization and Slag Formation Model for the Electric Arc Furnace* ISIJ International 48 (9) (2008), s. 1197-1205.