



Bądź wygodny Zapomnij o reduktorze Butla Integra® już go ma

Z naszą nową butlą Integra® możesz liczyć na większe bezpieczeństwo, prostą obsługę i wygodę. Butla Integra® z wbudowanym reduktorem oszczędza Twój czas i pieniądze: teraz możesz szybciej podłączać butlę do przewodu gazowego i nie ponosisz kosztów związanych z zakupem reduktora.

W butlach Integra® dostępny jest argon oraz szeroka gama mieszanek spawalniczych, w tym doceniane przez naszych Klientów mieszanki Linx®, czyli wszystkie gazy niezbędne do spawania MIG, MAG i TIG.

Bądź wygodny i wypróbuj butlę Integra® bezpłatnie, aby dowiedzieć się więcej zapraszamy na naszą stronę airproducts.com.pl/integra

Wygodna butla? Butla Integra®

Jeśli mają Państwo jakiegokolwiek pytania, prosimy o kontakt: infolinia 0801 100 801 lub infopl@airproducts.com

**AIR
PRODUCTS** 

tell me more
airproducts.com.pl/integra

Technologie tlenowo-paliwowe oraz strategie dla wtórnego topienia aluminium

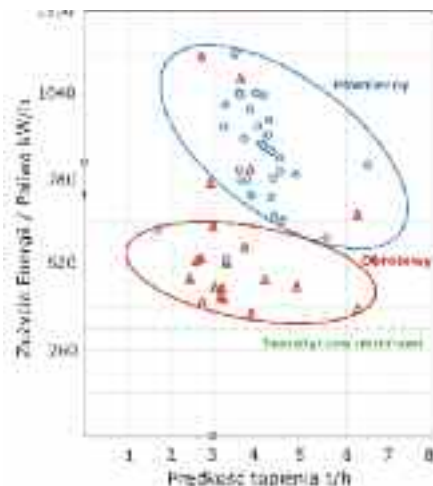
Autoryzy: Shailesh Gangoli, Bruce Kenworthy, Greg Buragino, Russell Hewertson, Anup Sane i Jeff Mocsari

Wprowadzenie

Spalanie tlenowo-paliwowe (oxy-fuel, OF) definiowane jest jako częściowe lub całkowite zastąpienie powietrza (air-fuel, AF) tlenem jako utleniaczem w procesie spalania. Od dawna znane jest ze swojej wysokiej skuteczności i wydajności topnienia¹. Dzięki wyeliminowaniu z procesu azotu palniki OF redukują ilość ciepła traconego przez gazy wylotowe wydzielane z pieca, tj. większa część ciepła z palnika dostępna jest do wykorzystania w procesie topienia (por. Zaawansowane techniki poprawy wydajności procesu i rysunek 2).

Piece do wtórnego topienia metalu nieżelaznych występują w różnych typach, kształtach i rozmiarach. Zazwyczaj pełne spalanie tlenowo-paliwowe jest najbardziej korzystne w piecu obrotowym, w którym gorąca wymurówka pieca aktywnie uczestniczy w przekazywaniu ciepła do metalu, gdy podczas obrotu stale się z nim stykając, przekazuje energię. Piec płomienny jest mniej wydajny ze względu na mniejszy udział wymurówki w przekazywaniu energii do metalu. Tabela 1 przedstawia względne porównanie pełnego spalania tlenowo-paliwowego w piecach obrotowych i płomiennych. Aby przekazać taką samą ilość energii do metalu (2 MWh), niezbędny jest o około 38% wyższe zapotrzebowanie na energię w przypadku pieca płomiennego (4 MWh) w porównaniu z piecem obrotowym (2,9 MWh).

Tabela 1 przedstawia dane operacyjne zebrane przez lata pracy różnych pieców obrotowych i płomiennych, zgodnie z danymi przed-



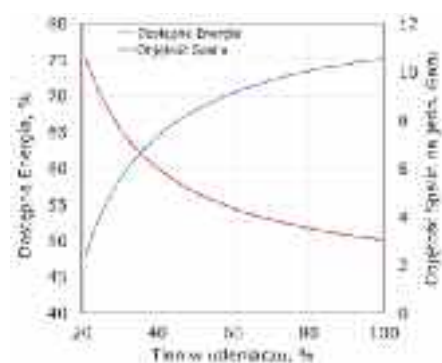
Rysunek 1. Zużycie paliwa vs prędkość topienia w piecach obrotowych i płomiennych.

stawionymi na rysunku 1. Kluczową zmienną, na którą należy zwrócić uwagę w tabeli 1, jest tzw. współczynnik pieca, który definiowany jest jako wartość procentowa całkowitej dostępnej energii (obliczana przy danej temperaturze gazów wylotowych, np. 1100°C, tabela 1, rysunek 2), która jest faktycznie absorbowana przez metal podczas cyklu topienia. Współczynnik pieca jest funkcją typu pieca, konfiguracji cyrkulacji gazów (single pass/double pass), rodzaju i grubości materiału ogniotrwałego, liczby i umiejscowienia palników względem wsadu/metalu, umieszczenia i wielkości przewodu wylotowego, objętości gazów wylotowych i dostępnego czasu umożliwiającego zakończenie wymiany ciepła. Upraszczając, jest to miara wydajności pieca do przesyłania energii do metalu. Współczynnik ten wynosi zazwyczaj około 85 - 90% w piecach obrotowych oraz około 50 - 65% w piecach płomiennych.

nych z powodów wyjaśnionych powyżej.

Zaawansowane techniki poprawy wydajności procesu

Ogólna wydajność transferu energii w procesie topienia jest połączeniem dostępnego ciepła/energii i współczynnika pieca. Dostępna energia zdefiniowana jest jako część całkowitej energii dostarczonej do procesu, która „nie jest wynoszona z pieca przez gazy wylotowe”, a więc teoretycznie „dostępna” dla topienia metalu. Energia wynoszona przez gazy wylotowe stanowi funkcję objętości i temperatury, z jaką gazy wylotowe wydostają się z pieca. Palniki tlenowo-paliwowe eliminują azot z procesu, redukując objętość gorących spalin i w konsekwencji strat energii. Rysunek 2 przedstawia, w jaki sposób dostępna energia, jako procent energii dostarczonej, oraz objętość gazów wylotowych (flue gas, FG) generowanych na jednostkę objętości gazu ziemnego (NG) zmieniają się wraz z udziałem procentowym tlenu w utleniaczu (wzbogacaniem tlenowym) w procesie spalania (gdzie 20,9% = powietrze, 100% = tlen). Rysunek przedstawia, w jaki sposób objętości gazów wylotowych a co za tym idzie straty energii szybko spadają, a dostępna energia gwałtownie rośnie wraz ze wzrostem wzbogacenia/udziału tlenu w procesie spalania.



Rysunek 2. Dostępna energia (przy temperaturze gazów spalinowych = 1100°C) i objętości gazów wylotowych (FG) generowane na jednostkę gazu ziemnego w funkcji procentowej zawartości tlenu w utleniaczu (lub wzbogacania w tlen).

W tabeli 1 widać, iż w przypadku tlenowo-paliwowego pieca płomiennego pracującego z mocą 4 MWh do metalu i jego topienia przekazywane są 2 MWh. Natomiast w przypadku pieca powietrzno-paliwowego („A” w tabeli 2), aby przekazać tę samą ilość energii do metalu, jak w piecu tlenowym, trzeba

TABELA 2. PORÓWNANIE METODY POWIETRZNO-PALIWOWEJ, TLENOWO-PALIWOWEJ I POWIETRZNO-TLENOWO-PALIWOWEJ W PIECACH PŁOMIENNYCH

Opis	Jedn.	AF	25% wzrostu produkcji		
			OF	AOF	Boost AOF
		A	B	C	D
Energia dostarczana	MWh	7,7	5,04	6,65	8,9
Tlen w utleniaczu	%	20,9	100	35,0	22,9
Dostępna energia	%	42,7	75,2	60,3	46,8
Wsp. pieca (FF)	%	60,0	65,7	63,4	59,7
Energia w spalinach	MWh	4,4	1,2	2,6	4,7
Energia do metalu	MWh	2,0	2,5	2,5	2,5
Jedn. zużycie energii	MW/t	1,14	0,6	0,76	1,05
Jedn. zużycie tlenu	Nm³/t	0,0	113,0	81,0	31,0
Objętość spalin	m³/h	8700	1412	4350	9058

dostarczyć prawie dwa razy więcej energii (7,7 MWh). Przypadki B, C i D przedstawiają różne możliwości zwiększenia wydajności o 25% w stosunku do wyjściowych parametrów „A”. Opcja B jest to piec tlenowy OF (5,04 MWh), z objętością gazów wylotowych mniejszą o 84% i zużyciu tlenu 113 Nm³/t. W C i D zastosowano kombinację opalania powietrzno-paliwowego i tlenowo-paliwowego, określaną również jako opalanie powietrzno-tlenowo-paliwowe (AOF), aby uzyskać 25% wydajności przy zachowaniu zużycia tlenu niższego niż w przypadku B, czyli odpowiednio 31 i 81 Nm³/t. Przypadki B, C i D umożliwiają intensyfikację/zwiększenie produkcji z istniejącego pieca przy minimalnych nakładach inwestycyjnych (krótki zwrot). Poniżej przedstawiono wybrane opcje zwiększenia wydajności w piecach płomiennych.

Dodatkowe palniki tlenowo-paliwowe (dogrzew/boosting): W przypadku konieczności wzrostu wydajności istniejącego pieca, gdzie istnieje tylko ograniczona możliwość ingerencji w jego konstrukcję, odpowiednio dobrane i rozmieszczone palniki tlenowo-paliwowe mogą być wykorzystane do zwiększenia wydajności, współpracując z istniejącymi palnikami powietrzno-paliwowymi. W tym przypadku energia dodana przez palniki tlenowo-paliwowe stanowi tylko część całkowitej energii dostarczonej do pieca. Przypadek D w tabeli 2 przedstawia rozwiązanie, gdzie dodanie palników tlenowo-paliwowych, pracujących z mocą 1,1 MWh (13% całkowitej mocy), do pieca zasilanego palnikami powietrzno-paliwowymi o mocy 7,7 MWh („A”) może zwiększyć wy-

dajność o 25%. Jest to atrakcyjna metoda poprawy wydajności przy umiarkowanych kosztach inwestycyjnych i stosunkowo czasie zwrotu (< 3 miesięcy). Modelowanie numeryczne CFD procesu jest wykorzystywane do ustalenia optymalnej lokalizacji palników oraz analizy interakcji pomiędzy płomieniami. Kontrola sposobu dostarczania i dystrybucji energii mają kluczowe znaczenie dla powodzenia pracy instalacji.

Przykładowo, instalacja dogrzewu/boostingu tlenowo-paliwowego w piecu płomiennym została z powodzeniem zrealizowana w firmie Sapa Extrusions, Inc. przy zastosowaniu palnika tlenowo-paliwowego Air Products. Uzyskano wzrost wydajności o 15%².

Stała praca powietrzno-tlenowo-paliwowa: Jeden z pierwszych pieców płomiennych przekształconych do procesu topienia wspomaganego tlenem był piec w Roth Brothers (później Wabash Alloys) w East Syracuse, NY. Piec z zimnym powietrzem został zmodernizowany i wyposażony w palniki powietrzno-tlenowo-paliwowe (AOF) Air Products w celu zwiększenia wydajności i ograniczenia zużycia paliwa. Zarówno w trybie AF, jak i AOF piec wykorzystywał mechaniczną pompę metalu wspomagającą proces topienia i ujednolicania temperatur roztopionego metalu. Układ pracował ze stałą wartością wzbogacania tlenem w całym cyklu topienia. Wydajność produkcji została zwiększona o 35% (z 70 ton/dzień do 95 ton/dzień), a zużycie energii zostało obniżone z ponad 1,3 MW/t do 0,81 MW/t^{4,5}. Poziom wzbogacania (tlen w powietrzu) zastosowany do uzyskania powyższych wyników wynosił 35%, a zużycie jednostkowe tlenu wynosiło

75 Nm³/tonę aluminium. Temperatury gazów wylotowych były nieco niższe w przypadku pracy w trybie AOF, wykazując poprawę współczynnika pieca i zwiększony transfer ciepła/energii do metalu.

Wykorzystanie elastyczności palnika powietrzno-tlenowo-paliwowego AOF w pełnym zakresie działania: Procesem topienia metali nieżelaznych zazwyczaj towarzyszą dalsze operacje takie, jak rafinacja, redukcja, stopowanie i odgazowywanie. W wielu przypadkach operacje te są przeprowadzane w tym samym piecu. Wymaga to zmian dostarczanej mocy do pieca, co wpływa na zmniejszenie objętości gazów wylotowych, a w konsekwencji obniża ciśnienie w piecu. W przypadku braku precyzyjnej kontroli może to doprowadzić do strat energii z powodu napływu zimnego zewnętrznego powietrza oraz strat wydajności poprzez utlenianie metalu.

Palnik Tunable Enrichment jest palnikiem powietrzno-tlenowo-paliwowym umożliwiającym pełne sterowanie zakresem wzbogacenia w tlen. Może on pracować w trybie (OF) tlenowo-paliwowym (przypadek B, tabela 2) podczas topienia, czyli kiedy właściwości energetyczne płomienia tlenowego będą najlepiej wykorzystane, lub w trybie powietrzno-tlenowo-paliwowym (przypadek C) albo jako palnik powietrzno-paliwowy (przypadek A) podczas pozostałych części cyklu/procesu. Ta strategia kontroli wykorzystania właściwości palnika pomaga kontrolować objętość gazów wylotowych i stabilizuje ciśnienie w piecu, jednocześnie optymalizując całkowite zużycie tlenu. Podejście to zapewnia również elastyczność operacyjną umożliwiającą dostosowanie do różnych wymagań produkcyjnych, tj. pracę w trybie pełnego spalania tlenowego podczas wysokiego zapotrzebowania energetycznego oraz w trybie powietrzno-paliwowym, gdy to zapotrzebowanie jest niskie.

Nowa generacja technologii tlenowo-paliwowych: Tradycyjne technologie topienia polegają na przekazywaniu energii do metalu poprzez promieniowanie od płomienia palnika wewnątrz pieca. To podejście ogranicza możliwości produkcyjne ze względu na niższy współczynnik pieca.

Opracowana przez Air Products^{6,7,8} nowatorska technologia topienia z wykorzystaniem tlenowo-paliwowego palnika Transient Heating Burner (THB) umożliwia równomierną i kontrolowaną dystrybucję energii do metalu, co znacząco poprawia wartość współczynnika pieca w porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami.

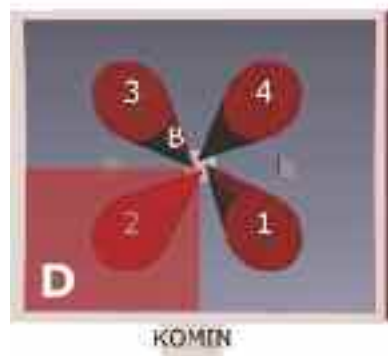
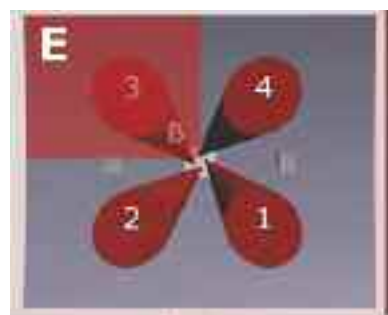


Rysunek 3. Schemat ideologiczny instalacji i działania palnika THB.

Bezpośredni styk płomienia ze wsadem jest najszybszym i najskuteczniejszym sposobem przenoszenia ciepła. Jednakże należy zachować ostrożność, aby uniknąć miejscowego przegrzania i utleniania. Palnik THB jest rozwiązaniem, które wykorzystuje odpowiednio rozmieszczone w piecu czujniki w celu maksymalizacji tempa topienia poprzez zapewnienie równomiernego rozkładu temperatur w piecu.

Na rysunku 3 przedstawiono schematycznie zasadę montażu palnika THB w sklepieniu pieca. Ilość energii i czas niezbędny do kierowania energii w kierunku danego kwadrantu pieca może być wstępnie określony, nastawiony i nadzorowany przez układ kontrolny palnika lub zautomatyzowany przez odpowiednio rozmieszczone w piecu czujniki tak, aby kierować więcej ciepła do chłodniejszych,

Rysunek 4. Przykład pracy płomienia palnika THB.



Rysunek 5. Zdjęcie palnika THB pracującego w piecu płomiennym - aluminium.

a mniej do bardziej nagrzwanych kwadrantów. Rysunek 4 przedstawia kwadranty pieca (zaznaczone na czerwono) kolejno/cyklicznie ogrzewane przez płomień (1-2-3-4).

Rysunek 5 przedstawia zdjęcie palnika THB pracującego w piecu płomiennym w AL-TREF w Brazylii. W tym przypadku palnik ogrzewa jednocześnie dwa przeciwległe kwadranty. W tej lokalizacji uzyskano wzrost wydajności o 35%, obniżenie zużycia paliwa o 48% oraz o 20% niższe straty topienia

w stosunku do podstawowej pracy w trybie powietrzno-paliwowym.

Poprawa Współczynnika Pieca poprzez zastosowanie mieszania ciekłego metalu: Mechaniczne lub elektromagnetyczne mieszalniki/pompy ciekłego metalu oraz mieszanie gazem obojętnym są powszechnie stosowane w piecach płomiennych w celu poprawy efektywności topienia. Technologie te można stosować bardzo skutecznie w połączeniu z technologiami tlenowo-paliwowym, ponieważ przepływ metalu poprawia Współczynnik Pieca poprzez zwiększenie możliwość absorpcji ciepła, przenoszenie ciepła z gorących obszarów pieca do obszarów chłodniejszych i przyspieszenie przekazywania ciepła z powierzchni metalu do dna pieca. Oprócz poprawy wymiany ciepła, mieszanie gazem obojętnym może zapewnić dodatkowe korzyści, takie jak odgazowanie (potencjalna eliminacja etapu pracy w dalszym ciągu produkcyjnym) oraz pokrycie powierzchni stopionego metalu w celu zapobiegania utlenianiu.

Porównanie technologii tlenowo-paliwowych w piecach obrotowych i płomiennych

Ogólna wydajność przenoszenia energii w procesie topienia jest połączeniem dostępnego ciepła i współczynnika pieca (por. Wprowadzenie). Współczynnik pieca w piecach obrotowych wynosi ~85 - 90%. Stąd też korzyści wynikające z zastąpienia powietrza tlenem w procesie opalania są prawie w pełni wykorzystywane w piecu obrotowym. Z tego powodu spalanie tlenowo-paliwowe jest naturalnym rozwiązaniem dla pieców obrotowych, gdzie jest szeroko stosowane. Dla porównania, piece płomienne są mniej wydajne, gdyż ich współczynnik pieca waha się w granicach 50 - 65%. Jest to spowodowane tym, że udział w przekazywaniu ciepła przez wymurówkę pieca jest dużo mniejszy w piecach płomiennych w porównaniu z obrotowymi.

Tabela 4 przedstawia porównanie spalania tlenowo-paliwowego w piecach obrotowych (1a, 1b) i płomiennych (2 - 6). W przypadku 1b ogólna wydajność tlenowego pieca obrotowego jest wysoka (67,7%), przy współczynnik pieca 90% oraz dostępna energią na poziomie 75,2. Dla porównania, zasilany zimnym powietrzem piec płomienny (przypadek 2) ma słabą wydajność (25,6%), co wynika z połączenia niższej dostępnej energii (42,7%) i słabego współczynnika pieca (60%). Ponadto w przypadku pieców płomiennych, przypadki 3 i 4 pokazują, w jaki sposób spalanie w trybie powietrzno-tlenowo-paliwowym i tlenowo-paliwowym może zostać wykorzystane do znacznej poprawy dostępnej energii i ulepszenia współczynnika pieca.

TABELA 3. OBLICZENIA PRZEDSTAWIAJĄCE SKUTECZNOŚĆ MIESZANIA W OPERACJI TOPIENIA

Opis	Jedn.	Z mieszaniem	Bez mieszania
		C	E
Energia dostarczana	MWh	6,5	5,2
Tlen w utleniaczu	%	35,0	35,0
Dostępna energia	%	60,3	60,3
Wsp. pieca (FF)	%	63,4	80,0
Energia w spalinach	MWh	2,6	2,0
Energia do metalu	MWh	2,5	2,5
Jedn. zużycie energii	MW/t	0,67	0,77
Jedn. zużycie tlenu	Nm ³ /t	74,0	57,0
Objętość spalin	m ³ /h	4350	3930

Przypadki 5 i 6 przedstawiają zalety najbardziej zaawansowanych rozwiązań, takich jak palnik THB Air Products (por. Nowa generacja technologii tlenowo-paliwowych), które poprawiają wydajność dzięki zaletom technologii tlenowo-paliwowej i poprawie współczynnika pieca płomiennego do 75%. Transfer ciepła jest znacznie wyższy, przy jednoczesnym minimalizowaniu miejscowego przegrzania lub utleniania aluminium, dzięki wykorzystaniu sprawdzonej metody sterowania równomiernym rozkładem energii w piecu^{6, 7, 8}. Współczynnik pieca można dodatkowo poprawić do 85% poprzez zastosowanie mechanicznego lub gazowego mieszania w celu poprawienia wymiany ciepła w kąpielii metalowej i zwiększenia zdolności metalu do pochłaniania ciepła (por. Poprawa współczynnika pieca poprzez zastosowanie mieszania ciekłego metalu). W ten sposób piec płomienny wykorzystujący technologię palnika THB oraz system mieszania metalu może osiągnąć ogólną sprawność (63,9%) zbliżoną do wydajności tlenowo-paliwowym pieca obrotowego (67,7%).

W warunkach niskich cen paliwa inwestowanie w zaawansowane techniki optymalizacji energii, takie jak częściowa lub pełna konwersja tlenowo-paliwowa i mieszanie mechanicz-

ne lub gazowe, może się wydawać mniej atrakcyjne. Jednakże wartość poprawionej wydajności (niższy koszt jednostkowy/tonę) przy takim samym poborze energii, obniżonej emisji, niższych objętościach gazów wylotowych, ograniczeniu unosu pyłów, mniejszej ilości zgarów często prowadzą do bardzo krótkich okresów zwrotu z inwestycji. Konwersja jednego pieca zapewnia niejednokrotnie ponad 1 mln dol. korzyści w skali roku. Wykorzystanie technologii palnika AOF Tunable Enrichment zapewnia elastyczność pozwalającą na spełnienie różnych wymagań produkcyjnych i lepsze zarządzanie kosztami operacyjnymi, ułatwiając w ten sposób realizację strategii, która umożliwia reagowanie na zmieniające się warunki ekonomiczne.

Wnioski

Technologia tlenowo-paliwowa stosowana była przez dziesięciolecia głównie w piecach obrotowych ze względu na wydajność i korzyści dla środowiska. Wysoka wydajność opalania tlenowo-paliwowego w piecach obrotowych wynika przede wszystkim z uzyskania wysokiego współczynnika pieca. Prace w zakresie przyjęcia technologii tlenowo-paliwowych w piecach płomiennych były wolniejsze ze względu na niższy współczynnik pieca. Technologia

palnika THB Air Products, wraz z technologią mieszania, zwiększa Współczynnik Pieca w piecach płomiennych, umożliwiając osiągnięcie wyników tego samego rzędu, jak dla pieców obrotowych (Tabela 4). Obecnie, operatorzy pieców płomiennych mogą cieszyć się zwiększoną wydajnością, zmniejszonym zużyciem energii w przeliczeniu na wagę produktu, zmniejszoną emisją i wysoką wydajnością metalu, którymi to operatorzy pieców obrotowych mogli cieszyć się od ponad 25 lat.



Pierwotna wersja niniejszego artykułu w języku angielskim została opublikowana w magazynie „Light Metal Age”, Fello Publishing Company, sierpień 2017 r.

Bibliografia

1. Baukal, CE, „Oxygen-Enhanced Combustion”, 2nd Edition, CRC Press, ISBN 9781439862285, 2013
2. Palazzolo, J., Sane, A., Hewertson, R., Chaleby, N., Hilbert, D., and Yutko, J., „Customized Combustion Solution Yields Productivity Improvement for Aluminum Extruder”, Light Metal Age, pp. 20, Aug 2015
3. Gangoli, SP, Slavejkov, AG, Buzinski, MD, „Staged Oxy-Fuel Burners and Methods for Using the Same”, U. S. Patent 9,664,381, 2017.
4. Hewertson, R. J. (2000) Improvements in Scrap Recycling and Dross Processing Using Oxygen, in Recycling of Metals and Engineered Materials (eds D. L. Stewart, J. C. Daley and R. L. Stephens), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781118788073.ch99
5. D’Agostini, M. D. High-Efficiency, High-Capacity, Low-NOx Aluminum Melting Using Oxygen-Enhanced Combustion. United States: N. p., 2000. Web. doi: 10.2172/765375.
6. Sane, AV, Gangoli, SP, Slavejkov, AG, Buzinski, MD, Cole, JD, Hendershot, RJ, He, X, „Transient Heating Burner and Method”, U. S. Patent 9,360,257, 2014.
7. Gangoli, SP, Hewertson, RJ, Sane, AV, Palazzolo, JC, He, X, „Selective Oxy-Fuel Boost Burner System and Method for a Regenerative Furnace”, US Pat No 9,657,945, 2017.
8. Sane, AV, Gangoli, SP, Slavejkov, AG, Buzinski, MD, Cole, JD, Hendershot, RJ, He, X, „Transient Heating Burner and Method”, US Pat App No 15/148,526, 2016.

TABELA 4. PODSUMOWANIE DOSTĘPNYCH OPCJI POPRAWY WYDAJNOŚCI I EFEKTYWNOŚCI PIECÓW OBROTOWYCH I PŁOMIENNYCH

Opis	Jedn.	Obrotowy		Płomienny				
		1a	1b	2	3	4	5	6
		Pow. paliwo	Tlen-paliwo	Zimne pow. paliwo	Pow. tlen-paliwo lub OF Boot	Tlen-paliwo	THB tlen-paliwo	THB OF + mieszanie
Dostępna energia	%	42,7	75,2	42,7	60,3	75,2	75,2	75,2
Współczynnik pieca	%	83,3	90,0	60,0	63,4	65,7	75,0	85,0
Ogólna wydajność	%	35,6	67,7	25,6	38,2	49,4	56,4	63,9
Szacunkowe właściwe zużycie paliwa	MW/t	0,9	0,48	1,26	0,84	0,65	0,57	0,50