

Zawracanie odpadów żelazonośnych do procesu stalowniczego w piecu EAF

Recycling of ferro-bearing waste to the steelmaking process in the EAF furnace

mgr inż. Marian Rachwalski¹; dr inż. Mariusz Borecki²

¹ Cognor S.A. Oddział Ferrostal Łabędy Sp. z o.o., ul. Anny Jagiellonki 47, 44-109 Gliwice, Polska

² Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, ul Karola Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, Polska

W stalowni Ferrostal Łabędy w Gliwicach wdrożono innowacyjną technologię zawracania zgorzeliny, powstającej w procesie ciągłego odlewania stali, do procesu stalowniczego w elektrycznym piecu łukowym. Nowa technologia polega na ograniczeniu efektu chłodzącego wynikającego z endotermicznych reakcji redukcji tlenków żelaza węglem. Efekt ten osiągnięto poprzez zaprojektowanie mieszanki, w której oprócz redukcji węglem zachodzi reakcja metalotermiczna realizowane za pomocą glinu.

W skład opracowanych i testowanych mieszanek, oprócz zgorzeliny i typowego w takich zastosowaniach reduktora węglowego, wchodziły różne materiały zawierające glin metaliczny. Starano się, aby nośnikiem glinu były materiały odpadowe, jak np. zgary aluminiowe lub odpady z folii aluminiowej i inne tego typu. Prace obejmowały dobór proporcji poszczególnych składników, opracowanie technologii aglomerowania mieszanki samoredukcyjnej oraz jej wprowadzania do pieca EAF. Prace nad składem mieszanki realizowano w warunkach laboratoryjnych, a następnie w trakcie testów przemysłowych.

W zakresie aglomerowania mieszankę brykietowano za pomocą prasy wibracyjnej oraz brykietarki walcowej. Wykonano również testy z zastosowaniem aglomeratów wielkogabarytowych w postaci beczek stalowych wypełnionych sypką mieszanką. Do wykonania brykietów stosowano spoiwo mineralne i organiczne.

W zakresie technologii wprowadzania wykonano ponad 100 wytopów testowych, w których samoredukcyjną mieszankę wprowadzano do pieca w różnych postaciach i ilościach. Operacja ta realizowana była jednorazowo wraz z poszczególnymi kosztami złomowymi oraz etapowo z podziałem na dwie porcje wprowadzane w I i II koszu złomowym. Mieszankę wprowadzano w ilości do 3 % masy wsadu żelazonośnego.

W wyniku wykonanych wytopów opracowano i wdrożono docelową technologię wykonywania wytopów z zawracaniem zgorzeliny do procesu stalowniczego. Uzysk żelaza ze zgorzeliny mieści się w zakresie 84-90%.

Słowa kluczowe: recykling; odpady żelazonośne; redukcja tlenków; aluminotermia; EAF

The Ferrostal Łabędy steel plant in Gliwice has implemented an innovative technology for returning the scale, which is formed in the process of continuous steel casting, to the steelmaking process in an electric arc furnace. The new technology involves reducing the cooling effect resulting from endothermic reactions of reducing iron oxides with carbon. This effect was achieved by designing a mixture in which, in addition to carbon reduction, there is a metallothermic reaction realized with aluminum.

The blends developed and tested included various materials containing metallic aluminum, in addition to scale and the carbon reductant typical in such applications. Efforts were made to use waste materials such as aluminum melting loss or aluminum foil waste and other such materials as a carrier for the aluminum. The work included the selection of the proportions of the various components, the development of the technology for agglomerating the self-reducing mixture and its introduction into the EAF furnace. The work on the composition of the mixture was carried out under laboratory conditions, followed by industrial testing.

In terms of agglomeration, the mixture was briquetted using a vibrating press and a roller briquetting machine. Tests were also carried out using large-size agglomerates in the form of steel drums filled with loose mixture. Mineral and organic binders were used to make briquettes.

In terms of introduction technology, more than 100 test heats were performed, in which the self-reducing mixture was introduced into the furnace in various forms and quantities. The operation was carried out one at a time with individual scrap baskets, as well as in stages with two portions introduced in scrap baskets I and II. The mixture was introduced in an amount of up to 3% by weight of the iron-bearing charge.

As a result of the heats, a target technology for performing smelting with scaling returning to the steelmaking process was developed and implemented. The iron yield from the scale is in the range of 84-90%.

Key words: recycling; iron-bearing waste; oxide reduction; aluminothermy; EAF

1. Wprowadzenie

Proces produkcji stali generuje znaczne ilo3ci odpad3w, w kt3orych znacz3cy udzia3l maj3 odpady 3elazono3ne. W3a3ciwo3ci fizyko-chemiczne 3elaza oraz warunki procesu technologicznego sprzyjaj3 utlenianiu si3 3elaza podczas kolejnych etap3w produkcji. W efekcie tworz3 si3 mniej lub bardziej bogate w 3elazo odpady cz3sto przypominaj3ce co do sk3adu chemicznego rud3 3elaza. W zale3no3ci od procesu technologicznego powstaje od 2 do 16 kg odpad3w na ton3 stali w przypadku obr3bki pozapiecowej do 150 do 350 kg na ton3 stali w przypadku procesu wielkopicowego [1].

W Stalowni Ferrostal 3ab3dy w Gliwicach r3wnie3 powstaj3 odpady produkcyjne bogate w tlenki 3elaza. Dominuj3cy udzia3l w3ród nich ma zgorzelina powstaj3ca w procesie ci3g3ego odlewania stali, kt3ora powstaje w ilo3ci ponad 1000 ton/rok. Odpad ten pochodzi z dw3ch 3r3d3e3, a mianowicie z ch3odni i z hydrocyklonu w obiegu wody ch3odz3cej. Odpad ten stanowi stosunkowo czysty i atrakcyjny no3nik 3elaza i mo3e s3u3y3c jako wart3ociowy zamiennik 3łomu dla pieca EAF pod warunkiem skutecznej redukcji tlenk3w 3elaza. Przyj3to, 3e warunkiem techniczno-ekonomicznym zawracania odpad3w 3elazono3nych do procesu stalowniczego jest uzyskanie redukcji 3elaza przynajmniej na poziomie 80% oraz nie zak33canie procesu wytapiania stali w wyniku endotermicznej reakcji redukcji tlenk3w 3elaza w3g3lem.

Osi3gni3cie tego celu wymaga3o opracowania odpowiedniej technologii, gdy3 redukcja tlenk3w 3elaza w utleniaj3cym procesie w piecu EAF jest trudna do osi3gni3cia. Uzyskanie odpowiedniego rezultatu wymaga wprowadzenia do pieca mieszaniny tlenk3w 3elaza i reduktora w formie aglomeratu (brykiet3w, grudek, odpowiednich pojemnik3w), tworz3c tym samym lokalne

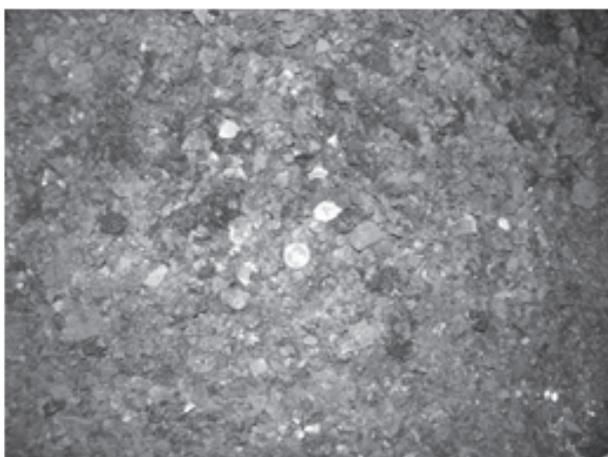
prze3strzenie redukcyjne. Udzia3l takiego dodatku nie mo3e przekracza3c kilku procent masy wsadu. Materia3y i technologie tego typu stosowane s3 w r33nych wariantach [2, 3], jednak3e skuteczno33 takich przedsi3wzi33 jest zr33nicowana. Ponadto standardowy w metalurgii proces redukcji tlenk3w 3elaza za pomoc3 w3g3la jest endotermiczny, co skutkuje och3łodzeniem wsadu i w konsekwencji spowolnieniem proces3w metalurgicznych. Zasadno33 stosowania tlenkowego wsadu 3elazono3nego zale3y od wielu czynnik3w technicznych, technologicznych i ekonomiczno-logistyczno-legislacyjnych (lokalnych relacji cen mi3dzy r33nymi sk3adowymi wsadu, koszt3w aglomeracji, ceny energii, dost3pno3ci ci3g33w podaj3cych wsad3w oraz wymaga33 i op3at za sk3adowanie/odb33r odpad3w).

Powstaj3ce w Stalowni Ferrostal zgorzeliny zawieraj3 ponad 60% 3elaza (tab. 1), a bior3c pod uwag3, 3e pozosta3a cz333 masy odpadu to w wi3kszo3ci tlen, kt3ory w procesach redukcji zostanie usuni3ty, stanowi3 one atrakcyjny materia3 wsadowy. Zgorzeliny z obu wspomnianych wcze3niej 3r3d3e3 r33ni3 si3 zauwa3alnie sk3adem ziarnowym, ale nie na tyle, aby musia3y by3 oddzielnie traktowane w niniejszych badaniach. (rys. 1).

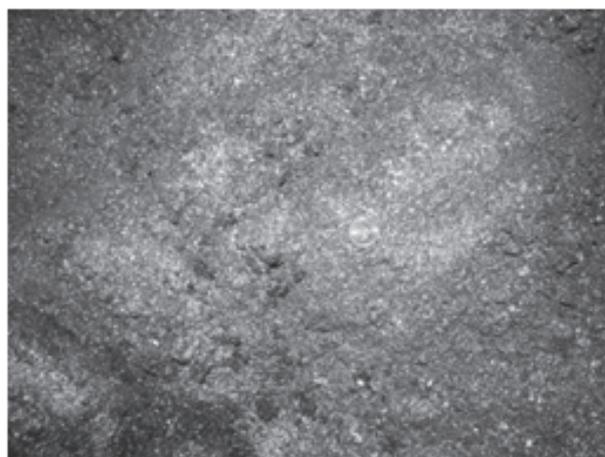
Tab. 1 Wyniki analizy chemicznej i fazowej zgorzeliny pod k3tem obecno3ci 3elaza

Tab. 1 Results of chemical and phase analysis of the scale for the presence of iron

Sk3adnik	Zgorzelina ch3odnia	Zgorzelina hydrocyklon
	[% mas.]	
Fe met.	1,17±0,4	3,13±0,4
Fe ca3k.	66,93±3,1	62,74±3,1
Magnetyt Fe ₃ O ₄	40,3±0,8	30,6±1,0
Hematyt a-Fe ₂ O ₃	6,8±0,8	2,6±1,0
Wistyt Fe _x O	31,5±0,8	44,5±1,0



a)



b)

Rys. 1 Odpady 3elazono3ne ze stalowni Ferrostal; a) zgorzelina z ch3odni , b) zgorzelina z hydrocyklonu
Fig. 1 Iron-bearing waste from the Ferrostal steelworks; a) cold storage scale, b) hydrocyclone scale

W stalowni Ferrostal podejmowano p33by zawracania odpad3w tlenkowych w formie samoredukcyjnych brykiet3w do pieca EAF wykonanych z mieszanki tlenk3w 3elaza i rozdrobnionego w3g3la w odpowiednich

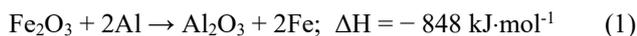
proporcjach. W warunkach stosunkowo ma3ego pieca jaki pracuje w Ferrostalu, p33by te nie da3y satysfakcjonuj3cych rezultat3w. Brykiety wprowadzano w r33nych fazach procesu i w r33nych ilo3ciach, ale we

wszystkich przypadkach dochodziło do miejscowego ochłodzenia wsadu i w konsekwencji zakłócenia oraz znacznego spowolnienia procesu, a redukcja była praktycznie niezauważalna w bilansie wytopu.

2. Założenia nowej technologii recyklingu zgorzeliny

Po nieudanych próbach z konwencjonalnymi mieszankami samoredukcyjnymi Stalownia podjęła współpracę z Instytutem Metalurgii Żelaza w Gliwicach, który obecnie wchodzi w skład Sieci Badawczej Łukasiewicz jako Górnośląski Instytut Technologiczny. W ramach realizowanego wspólnie projektu zaplanowano opracowanie technologii zawracania zgorzeliny w ilości do 3% masy wsadu, podawanej do pieca w postaci aglomerowanej samoredukcyjnej mieszanki o znacznie ograniczonym efekcie chłodzącym, która będzie realna technologicznie i uzasadniona ekonomicznie w warunkach Stalowni Ferrostal Łąbędy.

Idea nowej technologii sprowadzała się do ograniczenia efektu chłodzącego endotermicznej reakcji redukcji węglem. W tym celu zamierzono zaprojektować mieszankę, w której zachodzi reakcja metalotermiczna realizowana za pomocą metalicznego glinu. Reakcje metalotermiczne stosuje się powszechnie w metalurgii metali kolorowych [4, 5, 6]. Stosunkowo szeroko stosuje się reakcję aluminotermiczną (zwaną również termitową), która jest na tyle wydajna, że znalazła wiele zastosowań inżynierskich [7], jak np. do spawania szyn kolejowych lub w celach militarnych, np. do niszczenia panczerzy pojazdów bojowych. Entalpia reakcji zachodzącej w mieszance termitowej według równania (1), jest wystarczająca do podniesienia jej temperatury do wartości ok. 3000°C, a więc powyżej temperatur topnienia lub nawet wrzenia reagentów, związków pośrednich i końcowych



Klasyczny termit będący stechiometryczną mieszaniną sproszkowanego glinu i tlenków żelaza do zapłonu potrzebuje temperaturę powyżej 1000°C, co w warunkach pieca stalowniczego (temperatura pracy ok. 1600°C) jest z nadwyżką spełnione. Jednakże zastosowanie czystego termitu w redukcji zgorzeliny w piecu EAF jest wykluczone, gdyż doszłoby do uszkodzenia pieca, a nawet gdyby udało się temu zapobiec, koszt potrzebnego aluminium czyniłby technologię ekonomicznie nieuzasadnioną.

Tab. 2 Składy surowcowe testowanych mieszanek samoredukcyjnych
Tab. 2 Material Compositions of the tested self-reduction mixtures

Mieszanka	Zgorzelina	Nośnik węgla	Nośnik aluminium	Szacunkowy efekt energetyczny
	[% mas.]			[kJ·g ⁻¹]
1	70	20	10	-23
2	70	17,5	12,5	10
3	70	15	15	43
4	70	12	18	93

3. Projektowanie i testowanie hybrydowej mieszanki samoredukcyjnej

Celem badań było zaprojektowanie hybrydowej mieszanki, w której zachodzą równocześnie dwa procesy redukcji, a ich sumaryczna entalpia daje bilans energetyczny bliski zerowemu, a także opracowanie technologii jej podawania do pieca. Mieszanka miała być bezpieczna w stosowaniu i efektywna technologicznie. W mieszance egzotermiczna reakcja termitowa jest równoważona endotermiczną reakcją redukcji węglem. Tym samym wyznaczenie właściwych proporcji pomiędzy poszczególnymi składnikami mieszanki, to warunek stworzenia skutecznej, bezpiecznej i ekonomicznej technologii.

Równanie (1) opisuje stechiometrycznie proces redukcji czystego tlenku żelaza(III) czystym glinem, ale w rzeczywistości w reakcji uczestniczą odpady, a nie czyste substancje. Ponadto żelazo w zgorzelinie znajduje się na różnym stopniu utlenienia - tablica 2. Przykładowo, jeśli termit został sporządzony z tlenku żelaza(III), maksymalną efektywność osiąga się, gdy masowo zawiera on ok. 25% aluminium i 75% Fe₂O₃; reakcja redukcji tej mieszaniny przebiega według równania (1). Gdy termit jest sporządzony z użyciem tlenku żelaza (II) i żelaza (III) optymalne proporcje wynoszą 23,7% glinu oraz 76,3% Fe₃O₄; reakcja przebiega według równania (2), a jeszcze inaczej w przypadku FeO.



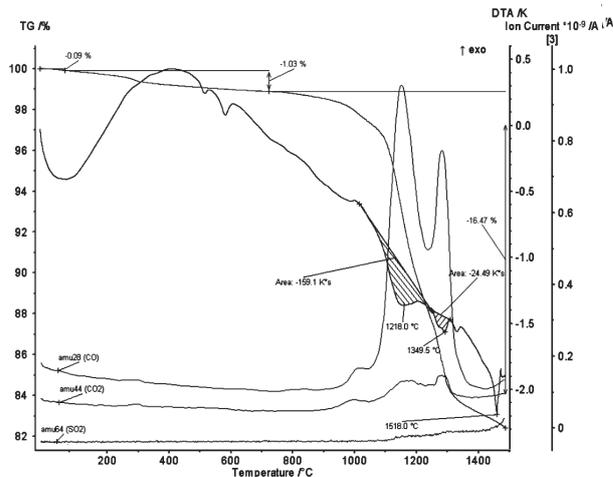
W projektowanej mieszance uwzględniono obecność węgla i jego wpływ na bilans energii. Na podstawie obliczeń ilości ciepła powstającego na mol żelaza przy redukcji danym reduktorem, wyznaczono technologicznie użyteczny parametr czyli sumaryczny efekt energetyczny redukcji jednostki masy żelaza. Na tej podstawie opracowano cztery warianty składu mieszanki uwzględniając rzeczywiste surowce przemysłowe oraz wskazany w procesach redukcji nadmiar węgla i obliczono bilans energetyczny (tab. 2). Jako nośnik węgla pierwotnie zastosowano używany w hucie materiał do spieniania żużla za pomocą CO₂, a później również mułki węglowe. Natomiast jako nośnik glinu testowano kilka materiałów, w tym odpadowe zgary aluminiowe, odpadowe wiórki żeliwno-aluminiowe, odpadową folię aluminiową oraz granulki stosowane w procesie produkcyjnym.

Zastosowanie material3w odpadowych, a zwlaszcza zgar3w aluminiowych o du3ym udziale zanieczyszcze3n nakazywa3y obliczenia zweryfikowa3 do3wiadczalnie. W pierwszym etapie bada3n zastosowano ro3nicowa3 analiz3 termiczn3 (Differential Thermal Analysis - DTA) i termogravimetri3 (Thermal Gravimetry - TG) wraz z analiz3 powstaj3cych gaz3w.

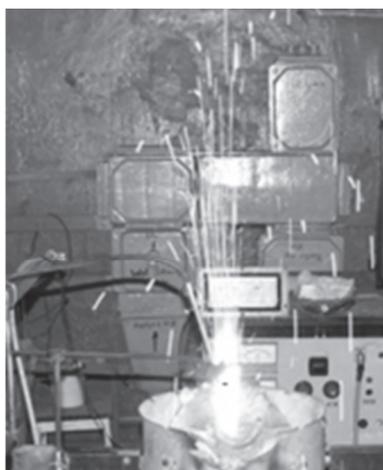
U3ycie obu reduktor3w w proporcjach zastosowanych w mieszance nr 1 daje znacznie ograniczony efekt endotermiczny (rys. 2). Na wykresie DTA widoczny jest efekt zlo3enia dw3ch reakcji. Efekt cieplny reakcji termitowej w temp. ok. 1200°C okresowo niweluje do zera ujemny, rozlo3ony w czasie, efekt energetyczny redukcji w3g3em.

W mieszankach z wi3kszym udzia3em glinu, efekt ten by3 bardziej wyra3ny, szczeg3lnie dla mieszanki nr 4. Na podstawie rezultat3w DTA stwierdzono, 3e wyniki oblicze3n maj3 dobre odzwierciedlenie w eksperymentach fizycznych. Do dalszych test3w laboratoryjnych dopuszczono wszystkie mieszanki. Wyniki test3w laboratoryjnych wskaza3y jednak, 3e mieszanka nr 4 mo3e

po wprowadzeniu do pieca reagowa3 zbyt intensywnie (Rys 3). W zwi3zku z tym testy przemys3owe ograniczono do mieszanek nr 1, 2 i 3.



Rys. 2 Wyniki analizy termicznej mieszanki nr 1
Fig. 2 Results of thermal analysis of mixture no. 1



a)



b)

Rys. 3 Metalurgiczne testy laboratoryjne kompozytu samoredukcyjnego; reakcja po wprowadzenia do pieca indukcyjnego mieszanki: a) nr 3, b) nr 4
Fig. 3 Metallurgical laboratory tests of self-reducing composite; reaction after introducing mixture into the induction furnace: a) No. 3, b) No. 4

W wytopach laboratoryjnych uzysk 3elaz ksztaltowa3 si3 na wysokim poziomie ponad 90% co dawa3o podstawy, aby oczekiwa3 warto3ci ponad 80% w wytopach przemys3owych (tab. 3). Rezultaty dla wszystkich mieszanek s3 bardzo zbli3one; bior3c pod uwag3

dok3adno3c jak3 mo3na uzyska3 podczas wytop3w stali uzn3c nale3y je za por3wnywalne. Wynika3o z tego, 3e w badanym zakresie udzia3 glinu w mieszance nie wp3ywa na stopie3n redukcji w mieszance, a jedynie na bilans energetyczny.

Tab. 3 Uzysk 3elaza z poszczeg3lnych mieszanek w wytopach laboratoryjnych
Tab. 3 Iron yield from individual mixtures in laboratory melts

Material	Wprowadzone 3elazo metaliczne	Wprowadzone 3elazo w tlenkach	Sumaryczna masa Fe	3elazo wytopione	Przyrost 3elaza metalicznego,	Uzysk Fe z kompozytu ^{a)}
	[g]					[%]
1	2	3	4	5	6	7
Mieszanka 1	1470,5	122,19	1596,69	1538,5	113,02	92,5
Mieszanka 2	1485,6	126,45	1612,05	1603,0	117,35	92,8
Mieszanka 3	1523,4	131,93	1655,33	1646,4	122,96	93,2
Mieszanka 4	1506,3	137,96	1644,26	1634,2	127,89	92,7

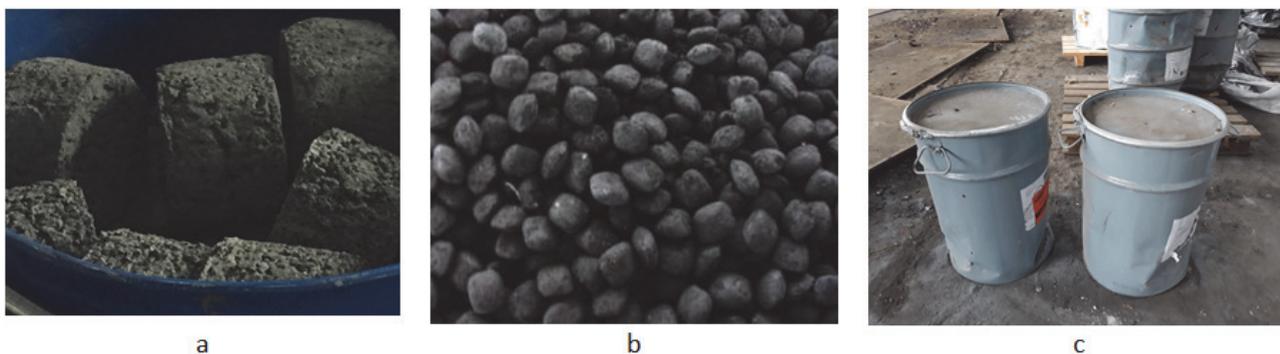
^{a)} stosunek kolumny 6 do 3 oznaczaj3cy procent zredukowanego 3elaza z kompozytu.

4. Aglomerowanie samoredukcyjnych mieszanek

Jednym z elementów prac na nową technologią było opracowanie najkorzystniejszej metody przygotowania mieszanki tak, aby umożliwić wprowadzenie jej do pieca standardowymi ciągami ładowania wsadu i uniknąć pylenia. W warunkach laboratoryjnych testowano spoiwa mineralne jak i organiczne. Stosowano zagęszczanie wibracyjne oraz poprzez prasownie mechaniczne.

W wyniku wykonanych prób stwierdzono, że mieszanka zgorzeliny, nośników glinu i nawęglacza jest materiałem trudnym w brykietowaniu. Materiały mieszanki charakteryzują się niskimi siłami adhezji, a np. zgary w kontakcie z wodą i wapnem mogą reagować chemicznie.

Każdy typ aglomeratów posiadał wady i zalety. Brykietowanie na prasie wibracyjnej z zastosowaniem spoiwa mineralnego jest stosunkowo prostą operacją pod warunkiem zastosowania udziału spoiwa mineralnego ponad 10%. Skutkuje to obniżeniem bogactwa żelaza w brykiecie i wzrostem zużycia energii na ogrzanie balastu jakim jest spoiwo. Sam proces brykietowania też nie jest wystarczająco wydajny. Brykietowanie na walcu walcowej okazało się procesem wymagającym pod względem doboru taniego spoiwa. Jednakże jest to metoda wydajna, a organiczne paliwo staje się dodatkowym źródłem węgla i energii. Aglomeraty wielkogabarytowe nie wymagają spoiwa, ale sprawiają problemy logistyczne. Ostatecznie do prób przemysłowych trafiły wszystkie typy aglomeratów (rys. 3).



Rys. 3 Brykiety zastosowane w wytopach doświadczalnych uzyskane: a) na prasie wibracyjnej z zastosowaniem spoiwa mineralnego, b) na brykietarce walcowej z zastosowaniem spoiwa organicznego, c) aglomeraty wielkoformatowe (perforowane beczki stalowe)

Fig. 3 Briquettes used in experimental melts obtained: a) on a vibrating press using a mineral binder, b) on a roller briquetting machine using an organic binder, c) large-format agglomerates (perforated steel barrels)

5. PRÓBY PRZEMYSŁOWE

W ramach prób przemysłowych wykonano 150 wytopów doświadczalnych w 17 seriach różniących się parametrami

technologicznymi. Należy zaznaczyć, że wykonano również dwie serie z mieszankami zawierającymi węgiel krzemowy, ale rezultaty nie były satysfakcjonujące. Wykaz poszczególnych serii zestawiono w (tab. 5).

Tab.5 Podstawowe parametry poszczególnych serii doświadczalnych z udziałem mieszanek zawierających nośnik węgla i aluminium metalicznego
Tab. 5 Basic parameters of individual experimental series involving mixtures containing carbon and metallic aluminum carriers

Seria wytopów	Nr kosza, w którym podawano kompozyt	Typ aglomeratu *)	Udział zgarów aluminiowych w mieszance **) [%]	Uzysk żelaza [%]
Seria 1	I	Brykiety A	10,0	89,66
Seria 2	I	Brykiety A	10,0	89,42
Seria 3	II	Brykiety A	10,0	89,13
Seria 4	III	Brykiety A	10,0	90,40
Seria 5	I	Wielkogabarytowy	10,0	89,16
Seria 6	I	Brykiety B	10,0	90,54
Seria 7	II	Brykiety B	10,0	91,37
Seria 8	I	Brykiety B	12,5	90,86
Seria 9	I	Brykiety B	15,0	90,90
Seria 10	I	Brykiety B	15,0	88,87

Seria wytopów	Nr kosza, w którym podawano kompozyt	Typ aglomeratu *)	Udział zgarów aluminiowych w mieszance **) [%]	Uzysk żelaza [%]
Seria 11	I + II	Brykiety B	15,0	89,54
Seria 12	I	Brykiety B	6,0 / 14,0**)	88,52
Seria 13	I	Brykiety B	3,0 / 15,0**)	88,78
Seria 14	I/II	Wielkogabarytowy	10,0	89,14
Seria 15	I	Wielkogabarytowy	10,0	89,90
Seria 16	I	Wielkogabarytowy	15,0	89,89
Seria 17	I	Wielkogabarytowy	15,0	90,93

*) Typ A - z prasy wibracyjnej, typ B – z brykietarki walcowej, typ Wielkogabarytowy - beczka stalowa.

***) Udział węgla krzemu.

Podczas testów przemysłowych aglomeraty wprowadzano w ilości ok. 1% do 4% masy wsadu. Podczas testów nie stwierdzono problemów technologicznych jakie miały miejsce podczas stosowania mieszanek bazujących jedynie na reduktorze węglowym. Za optymalne technologicznie i ekonomicznie uznano mieszanki nr 2 i 3 z ok. 10 - 12% udziałem nośnika aluminium (w zależności od jakości nośnika). Uzysk żelaza znacznie przekraczał 80%, a najlepsze wyniki przekraczały 90%.

Z wykonanych wytopów wynika, że mieszankę można podawać w dowolnym koszu złomowym lub dzielić na porcje, ale wprowadzanie jej w pierwszym koszu jest logistycznie najłatwiejsze w warunkach stalowni Ferrostal. Znaczenie ma również fakt zostawiania w piecu części ciekłego metalu z poprzedniego wytopu. Z testowanych aglomeratów najwygodniejsze w stosowaniu były brykiety z brykietarki walcowej, które ponadto ze względu na mniejszą ilość spoiwa pozwalały na wprowadzanie większej ilości zgorzeliny w jednostce masy mieszanki samoredukcyjnej. Wytopy doświadczalne dały podstawę do opracowania prostszej struktury wsadu w wytopach w których stosuje się opracowaną mieszankę. Zastosowany nadmiar reduktora węglowego pozwolił wyeliminować dodatek antracytu do pieca.

Wyniki wytopów doświadczalnych upoważniały, aby rekomendować wdrożenie opracowanej technologii do praktyki przemysłowej. W praktyce produkcyjnej stosuje się brykiety z ok. 12% udziałem nośnika Al, wprowadzanych w pierwszym koszu w ilości ok. 3% masy wsadu. Nośnikiem węgla są obecnie mułki węglowe. Uzyski żelaza wahają w zakresie 85% - 90%. Wdrożenie technologii pozwoliło zmniejszyć obciążenie środowiska naturalnego odpadami produkcyjnymi oraz ograniczyło zużycie surowców nieodnawialnych.

6. Podsumowanie

W wyniku wykonanych prac badawczo-rozwojowych opracowano i wdrożono technologię zwracania tlenkowych odpadów żelazonośnych do procesu stalowniczego. Wzbogacenie mieszanki tlenków żelaza

i węgla o dodatek glinu, wywołującego reakcję metalotermiczną, ograniczyło ujemny efekt energetyczny charakterystyczny dla konwencjonalnych mieszanek. Zaprojektowany na podstawie obliczeń bilansowych i wyników analizy termicznej skład mieszanki, a następnie zweryfikowany w wytopach laboratoryjnych, zapewnia wskaźniki technologiczne i ekonomiczne uzasadniające jej wdrożenie do praktyki produkcyjnej w Stalowni Ferrostal. Uzysk żelaza wprowadzanego wraz z odpadami tlenkowymi kształtuje się na wysokim poziomie, przekraczając 85%, a nawet do 90%. Wdrożenie technologii zmniejszyło obciążenie środowiska naturalnego odpadami produkcyjnymi oraz ograniczyło zużycie surowców nieodnawialnych.

Literatura

- [1] MRÓZ, J., KONSTANCIK, A., WARZECHA, M. i in. [2021], Research on Reduction of Selected Iron-Bearing Waste Materials, *Materials* 14 (2021) 1914, <https://doi.org/10.3390/ma14081914>, MDPI, Basel, Switzerland, <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/8/1914>, data dostępu 14.12.2022.
- [2] COMAN, G., PANTILIMON, M. C., GRĂDINARU C. i in., Recirculation of the Secondary Powder Material in the Primary Technological Fluxes in the Steelmaking EAF, *U.P.B. Sci. Bull., Series B*, 79 (2017) 3, ISSN 1454-2331, https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezc86_943035.pdf, data dostępu 15.12.2022.
- [3] YANG, Q., HOLMBERG, N., BJÖRKMANN, B. EAF Smelting Trials of Waste-Carbon Briquettes at Avesta Works of Outokumpu Stainless AB for Recycling Oily Mill Scale Sludge from Stainless Steel Production, *Steel Research International*, 80 (2009) 6.
- [4] ERIC, H. Treatise on Process Metallurgy: Volume 3: Industrial Processes, Chapter 1.10 - Production of Ferroalloys, 2014, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00005-5>, data dostępu 15.12.2022.
- [5] BUGDAYCI, M. [2021], Effect of mill scale usage on thermodynamic modeling and metallothermic production of FeMn alloys, *Kovove Materialy*. July 59 (2021), Bratislava, Slovak Republic.
- [6] KUDYBA, A., AKHTAR, S., JOHANSEN, I. i in [2021], Aluminothermic Reduction of Manganese Oxide from Selected MnO-Containing Slags, *Materials*. 14 (2021) 2 :356, MDPI, Basel, Switzerland, <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/2/356>, data dostępu 15.12.2022.
- [7] GRILL, J. [2019], *Thermit welding*, <https://weldguru.com/thermit-welding/>, data dostępu 15.12.2022.