

## ANALIZA SYSTEMU PRZETWARZANIA ODPADÓW POPRODUKCYJNYCH W BRANŻY HUTNICZEJ I ENERGETYCZNEJ

*Jacek SITKO, Krzysztof MICHALSKI*  
*Politechnika Śląska*

### WPROWADZENIE

Z uwagi na narastający rozwój na skalę globalną materiałów stosowanych do wyrobu dóbr codziennego użytku oraz ich wpływ na szeroko pojęte środowisko naturalne człowieka, należy w cyklu życia produktu oraz organizacji procesu utylizacji uwzględnić wszelkie elementy potencjalnych zagrożeń z tym związanych.

Ponieważ w procesach projektowania, logistyki, produkcji, eksploatacji i utylizacji mamy do czynienia z różnorodnymi problemami, które należy uwzględnić aby niekorzystny wpływ produktów ograniczyć do minimum, możemy tu korzystać z ogromnego bogactwa czynników stosowanych do analiz technologicznych oraz organizacyjnych.

Innowacyjne wyroby wytwarzane w przemyśle ciężkim wymagają zastosowania wysoko jakościowych procesów produkcyjnych i systemów organizacyjnych.

Innowacyjność w przypadku produktów tego typu oznacza ingerencję w skład chemiczny (możliwość zastosowania nowych związków oraz pierwiastków chemicznych), mikrostrukturę, która poza składem chemicznym jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o właściwościach (mechanicznych, fizycznych, użytkowych itp.), a przez to również zastosowaniu danego tworzywa.

Zapotrzebowanie na nowoczesne, zaawansowane wyroby, wymaga od producentów wprowadzania zmian technicznych, infrastrukturalnych, organizacyjnych i logistycznych. Istotną rolę odgrywa tu podejście procesowe [2]. Oczywiście częstokroć jest to związane w nakładami finansowymi.

Niniejsze opracowanie zawiera zbiór informacji na temat problemów przetwórstwa i utylizacji wyrobów z przemysłu hutniczego i energetycznego.

Do istotnych wyzwań rozwojowych można zaliczyć prace nad problemami utylizacji produktów ubocznych procesów przemysłowych. Szczególne znaczenie użytkowe ma wykorzystanie żużli z zawartością Zn-Pb, ze względu na szereg szkodliwych związków, stanowiące ciągłe wyzwanie technologiczne i utylitarne.

### ŻUŻLE POPRODUKCYJNE

Działalność energetyczna i hutnicza przyczynia się do wytwarzania dwóch typów żużli:

- żużle wielkopieczowe powstałe przy produkcji surówki
- żużle konwertorowe (stalownicze) powstałe w trakcie wytapiania stali, które po wytworzeniu są składowane i w całości sprzedawane odbiorcom [1].

Po zrealizowaniu procesu wytwórczego, możemy wyróżnić: żużel wielkopieczowy.

Dawniej, po zakończeniu wytopu surówki w wielkim piecu, żużel w stanie ciekłym, był spuszczaany do kadzi i wywożony na hałdy, gdzie po wylaniu spływał po zboczach i podlegał studzeniu w warunkach powietrznych.

W trakcie chłodzenia dochodzi do krystalizacji szeregu minerałów, głównie takich jak:

- krzemiany magnezu i wapnia,
- glinokrzemiany magnezu i wapnia,
- tlenki żelaza, manganu i magnezu.

Żużel konwertorowy-stalowniczy jest produktem wytapiania stali. Ciekły żużel z konwertora jest granulowany w celu powolnego zestalania, w trakcie którego w gorącej masie żużlowej krystalizują krzemiany dwu i trzy wapniowe, ferryt wapniowy, wustyt i zanieczyszczenia pochodzące z wsadu.

## **MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA ŻUŻLI**

Poniżej pokrótce scharakteryzowano możliwości powtórnego wykorzystania żużli:

- Proces odzysku żelaza z żużli – w pierwszym etapie przerobu żużli stalowniczych odzyskuje się zawarte w nich żelazo, które może występować w formie wolnej jako krople metalu zatrzymane w stygącym żużlu, bądź jako powstałe w procesie stalowniczym związki chemiczne. Technologia obejmuje dwie zasadnicze operacje: kruszenie żużla i separację magnetyczną. Kruszenie żużla jest prowadzone kilkustopniowo, przy użyciu kruszarek różnego typu i jest operacją wysoko energochłonną i powodującą szybkie zużycie urządzeń [3].
- Zastosowanie żużli do produkcji materiałów drogowych – frakcja niemagnetyczna jest segregowana na przesiewaczach na różne frakcje ziarnowe w zależności od wymagań odbiorców i stosowana w budownictwie drogowym, mieszkaniowym i innym.
- Zastosowanie żużli do produkcji materiałów wiążących – możliwość utylizacji żużli związana jest z właściwościami związków chemicznych wchodzących w ich skład, dzięki którym po zmieszaniu z wodą powstają hydraty o dużej wytrzymałości mechanicznej. Związki takie po zmieszaniu z piaskiem lub innym wypełniaczem oraz z wodą tworzą masę lejącą, która po pewnym czasie twardnieje i przybiera kształt formy.

W procesie produkcji żużli wielkopieczowych, opracowano technologię polegającą na mieszaniu z określonymi ilościami klinkieru, cementu portlandzkiego i gipsu. Otrzymuje się tzw. cement hutniczy, który po stwardnieniu jest odporny na wysokie temperatury i działanie wody. Cementy te stosuje się najczęściej do budowy dużych konstrukcji betonowych [5].

Obecnie, w świecie masa żużla w hutnictwie wynosi około 300 kg na tonę surówki, a w poszczególnych hutach waha się od około 180 kg/t do ponad 400 kg/t. W Polsce jeszcze do 1980 r. udział ten wynosił około 700 kg/t, a obecnie waha się między 300 a 400 kg/t surówki. Żużel wielkopieczowy jest stopem (w kolejności zmniejszającej się)

$\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – proporcja tych ostatnich dwu składników zmienia się w poszczególnych hutach, zawartość  $\text{MgO}$  może być większa lub mniejsza od zawartości  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Te cztery składniki stanowią około 95% masy żużla.

Żelazo zawarte w żużlu może występować albo w postaci wolnej jako skrzepy metalu zatrzymane w stygnącym żużlu, albo w postaci związków chemicznych. Najbardziej wartościowym składnikiem żużli stalowniczych jest żelazo metaliczne (jego zawartość kształtuje się na poziomie 5÷15%) [4]. Odzyskuje się żelazo przeważnie stosując kilkustopniowe rozdrobnienie i separację magnetyczną. Celem pierwszej separacji jest odzysk żelaza metalicznego. Stopień odzysku zależy przede wszystkim od uziarnienia podawanego na separator materiału. Stwierdzono, że zmniejszenie uziarnienia żużla z 1 do 0,25 mm prowadzi do zwiększenia ilości żelaza w koncentracie z 25 do 90%, przy czym pełne oddzielenie metalicznego żelaza od fazy żużlowej jest możliwe dopiero przy rozdrobnieniu żużla do uziarnienia 0,1 mm.

Odzyskiwanie złomu z żużli hutniczych przynosi podwójną korzyść. Z jednej strony otrzymuje się kruszywa hutnicze oczyszczone w większości z wtrąceń magnetycznych, co znacznie poprawia ich jakość; z drugiej złom, którego deficyt odczuwalny jest przez huty.

Wcisło Z., Stachura i inni w referacie pt.: „Wykorzystanie wybranych odpadów metalurgicznych na komponenty wsadowe do procesów hutniczych i produkcji cementu” [8] przedstawili możliwości wykorzystania wybranych odpadów zawierających w składzie znaczne udziały tlenków żelaza, takie jak zendra powalcownicza, żużel z odsiarczania surówki żelaza, szlam i osad pofiltracyjny, frakcja magnetyczna z żużla, pył wielkopiecowy. Na podstawie analizy ich składu chemicznego i uziarnienia ocenili ich przydatność do redukcji i do produkcji cementu.

Przy zastosowaniu własnego programu komputerowego, wykorzystywanego do zestawienia wsadu na taśmę spiekalniczą Arcelor Mittal Steel Oddział Kraków, przeprowadzono obliczenia namiaru wsadu spiekalni, uwzględniając wykorzystanie szlamu i osadu pofiltracyjnego, frakcji magnetycznej ze składowiska żużla. Obliczenia wykazały, że możliwe jest zagospodarowanie szlamu i osadu pofiltracyjnego w ilości 15 kg na tonę spieku, frakcji magnetycznej – 14 kg na tonę spieku oraz żużla z odsiarczania surówki w ilości 8 kg na tonę spieku (zawartość alkaliów 1,5 kg/t spieku, zawartość cynku – 0,21 kg/t spieku). Ww. masy materiałów odpadowych nie wpływają na obniżenie jakości spieku oraz nie przyczyniają się do pogorszenia pracy wielkich pieców i jakości surówki [7].

Wykorzystanie hutniczych odpadów żelazonośnych do produkcji klinkieru powinno być poprzedzone analizą spełniania przez nie kryteriów zapewniających uzyskanie w klinkierze wymaganych udziałów składników mineralnych, decydujących o hydraulicznych właściwościach gotowego produktu oraz w właściwych parametrach użytkowych cementu, takich jak: określony poziom wytrzymałości, właściwy czas wiązania, czy stałość objętości. Składniki stosowane do produkcji cementu ocenia się przede wszystkim pod kątem ich składu chemicznego.

Zakres stosowania odpadów żelazonośnych ograniczony jest obecnością w nich szkodliwych dla domieszek. W cementowej mieszance surowców zawartość MgO ograniczona jest do 2,5% mas. Zawartość alkaliów, jak i siarki nie powinna być większa niż 1% mas., a ilość fosforu w klinkierze nie może przekraczać 2% mas., co odpowiada około 1,3% mas.  $P_2O_5$  w mieszaninie surowców.

Żużle te w postaci sypkiego granulatu, o zawartości %: 0,5-5 Cu; 0,1-1,0 Pb; 15-25 C (koks); 0,5-6,5 g/t Au; 100-450 g/t Ag, o następującym składzie ziarnowym:

|              |       |          |         |       |
|--------------|-------|----------|---------|-------|
| Frakcja, mm  | +10   | -10 ÷ +5 | -5 ÷ +3 | -3    |
| Zawartość, % | 15-20 | 45-50    | 8-10    | 40-50 |

kierowano do hut miedzi, gdzie przetapiane były w piecach szybowych wraz z surowcami miedziowymi.

W celu udoskonalenia procesu przerobu żużli z pieców przewałowych, charakteryzujących się stosunkowo niską zawartością miedzi i metali szlachetnych opracowano i sprawdzono w instalacji pilotowej, nową technologię polegającą na fluidyzacyjnym chlorującym prażeniu żużli z kolejnym hydrometalurgicznym przerobem produktu prażenia. Technologia obejmuje niżej wymienione operacje:

- Prażenie chlorujące.
- Absorpcja chlorków metali w kwaśnych roztworach chlorkowych.

W badanych technologiach osiągnięto zakładane cele, to jest:

- Odzysk wartościowych metali w produktach użytecznych takich jak ołów surowy, miedź surowa, kamień miedziowy, pyły Zn-Pb.
- Przekształcenie nie zredukowanej pozostałości w surowiec mineralny – niewymywalny w wodzie i żużel krzemianowy o niskiej zawartości metali ciężkich [6].

Przy stosowaniu pieca elektrycznego jest możliwość odzysku Pb i Fe w postaci metalicznej oraz zachowanie siarki w kamieniu miedziowym. Reduktor TSL pozwala na otrzymanie żużli końcowych o niskiej zawartości cynku, bezpośrednie otrzymanie metalicznej miedzi i przeprowadzenie siarki do gazów technologicznych kierowanych do odsiarczania. Specjalistyczne badania potwierdziły możliwość wykorzystania żużli krzemianowych w budownictwie jako kruszywo, wypełniacz mas bitumicznych i do wytwarzania betonu.

Podstawowe kierunki wykorzystania tego żużla są następujące:

- Jako składnik podsadzki hydraulicznej do wypełnienia pustek,
- Produkcja ścierniwa do prac strumieniowo-ciernych,
- Prace rekultywacyjne.

## PROBLEM SEPARACJI MAGNETYCZNEJ ŻUŻLI POPRODUKCYJNYCH

Badania separacji magnetycznej żużli przeprowadzono w wielkolaboratoryjnym analizatorze magnetycznym typu DAVISA.

Żużel do badań zmielono w młynie kulowym i przesiano otrzymując proszek o uziarnieniu < 0,2 mm, z którego sporządzono zawiesinę wodną dozowaną przy ciągłym

mieszaniu do separatora magnetycznego. Uzyskane przy separacji frakcje filtrowano i suszono otrzymując frakcję magnetyczną i frakcję niemagnetyczną.

Wyniki badań separacji magnetycznej żużli zestawione w tablicy 2 są wielkościami średnio arytmetycznymi z trzech eksperymentów przeprowadzonych w identycznych warunkach.

Badania wykazały, że sposobem separacji magnetycznej można rozdzielić żużel o początkowej zawartości 34,5%Fe i 8,29%C na frakcję magnetyczną o zawartości 44,6%Fe i frakcję niemagnetyczną wzbogaconą w węgiel nadającą się do zawrotu do pieca hutniczego.

Średni uzysk żelaza do frakcji magnetycznej  $U_{Fe} = 70,1\%$ ; a średni uzysk węgla do frakcji niemagnetycznej  $U_C = 93,9\%$ . Wykazano, że cynk przechodzi wraz z żelazem do frakcji magnetycznej. W oparciu o przeprowadzone badania opracowano koncepcję technologii utylizacji żużli z pieców hutniczych, której istotą jest separacja magnetyczna zmielonych żużli.

## PODSUMOWANIE

Przedstawione problemy wymagają zastosowania innowacyjnych rozwiązań w dziedzinie technologii i organizacji, pozwalających na kompleksowe rozwiązanie w aspekcie zagospodarowania produktów hutniczych oraz branży energetycznej.

Pogłębiona część artykułu ma charakter przeglądu osiągnięć w zakresie procesu utylizacji odpadów poprodukcyjnych żużli, stanowiących znaczną część produktów w procesie produkcyjnym. Przedstawione rodzaje i najważniejsze właściwości odpadów poprodukcyjnych w postaci żużli, może służyć do dalszych badań, mających na celu dobór najskuteczniejszych metod przerobu i wykorzystania odpadów.

Zawarte w artykule analizy i spostrzeżenia dotyczące problemów przerobu odpadów poprodukcyjnych mogą posłużyć jako elementy podstawy do dalszych badań i wdrożeń przemysłowych.

Metoda separacji magnetycznej stanowi dobrą bazę do wyodrębnienia i przerobu materiałów magnetycznych i niemagnetycznych w celu zastosowania w szerokim zakresie branży hutniczej, energetycznej i in.

## LITERATURA

1. J. Bendkowski, M. Wengierek. *Logistyka odpadów*. Tom I. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2002.
2. M. J. Ligarski. *Podejście systemowe do zarządzania jakością w organizacji*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2010
3. I. Jonczy. *Charakterystyka mineralogiczno-chemiczna szkliw z żużli hutniczych*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2011, tom 27, nr 1, s.155.
4. A. Konstanciak, W. Sabela. *Odpady w hutnictwie żelaza i ich wykorzystanie*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze, 1999, nr 12, s.572.
5. J. Sitko. *Problems of materials management in the casting industry*. Arch. Foundry Eng. 2008 vol. 8 iss. 3, s. 217-220.

6. J. Sitko. *The problem of quality thermoisolation products in selected company*. Zesz. Nauk. AM Szczecin 2010 nr 24, s. 100-104.
7. M. Rzeszowski, K. Zieliński i in. *Metody odzysku żelaza z żużli hutniczych i możliwości jego wykorzystania*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze, 2004, nr 1, s.15.
8. Z. Wcisło, R. Stachura i in. *Wykorzystanie wybranych odpadów metalurgicznych na komponenty wsadowe do procesów hutniczych i produkcji cementu*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze, 2010, nr 9, s.476

*Data przesłania artykułu do Redakcji: 04.2017*

*Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 05.2017*

**dr inż. Jacek Sitko**

Politechnika Śląska

Wydział Organizacji i Zarządzania

Instytut Inżynierii Produkcji

ul Roosevelta 26, 41-800 Zabrze, Polska

tel.: +4832 277 73 50,

e-mail: jacek.sitko@polsl.pl

**dr inż. Krzysztof Michalski**

Politechnika Śląska

Wydział Organizacji i Zarządzania

Instytut Inżynierii Produkcji

ul Roosevelta 26, 41-800 Zabrze, Polska

tel.: +4832 277 73 51,

e-mail: krzysztof.michalski@polsl.pl

## **ANALIZA SYSTEMU PRZETWARZANIA ODPADÓW POPRODUKCYJNYCH W BRANŻY ENERGETYCZNEJ I HUTNICZEJ**

**Streszczenie:** Artykuł prezentuje przegląd wybranych zagadnień związanych z problemem przerobu i wykorzystaniem żużli z przemysłu energetycznego oraz hutnictwa Zn-Pb. Zróżnicowany skład chemiczny oraz struktura stwarza dla technologii utylizacji szereg trudności, które należy pokonać aby umożliwić szerokie wykorzystanie żużli w przemyśle. Innowacyjne podejście do procesu utylizacji zwiększa szanse na rozwiązanie wielu problemów technologicznych i organizacyjnych w branży energetycznej i hutniczej.

**Słowa kluczowe:** proces, recykling, żużel, energia

## **ANALYSIS OF THE SYSTEM PROCESSING WASTE PRODUCTS IN ENERGY AND METALLURGICAL INDUSTRY**

**Abstract:** In the article essential issues associated with the innovative solutions were presented in heavy industry along with the deepened review characteristics and problems of using metallurgical slag from the energy industry and the Zn-Pb metallurgy.

**Key words:** process, recycling, slag, energy