

Roll compaction of converter sludge

Kompaktowanie szlamu konwertorowego w prasie walcowej



DOI: 10.15199/62.2025.10.13

Converter sludge was mixed with post-carbide lime (5–10%) and molasses (5–10%) as two-component binder and compacted in a roller press. Gravity or screw feeder was used and mixts. with a moisture content of 1.5–5% were agglomerated. Density and drop resistance of the agglomerates and specific energy consumption were detd.

Keywords: converter sludge, compacting, roller press

Szlam konwertorowy zmieszany z wapnem pokarbidowym (5–10%) i melasą (5–10%) kompaktowano w prasie walcowej. Scalano mieszanek o wilgotności 1,5–5%, stosując dozownik grawitacyjny lub ślimakowy. Określono gęstość aglomeratu i jego wytrzymałość na zrzut oraz jednostkowe zapotrzebowanie na energię.

Słowa kluczowe: szlam konwertorowy, kompaktowanie, prasa walcowa

Szlam konwertorowy powstaje w procesie mokrego odpylania gazu konwertorowego ze stalowni konwertorowo-tlenowej i w większości deponowany jest w stawach osadowych na terenie hut^{1–3}. Jest to odpad z produkcji stali pierwotnej w technologii wielkiego pieca (BF) i konwertora tlenowego (BOF), którą obecnie wytwarza się na świecie w ilości ok. 72%^{2–6}. Od 2020 r. w Polsce działa tylko jedna huta zintegrowana BF-BOF produkująca ok. połowę stali surowej w naszym kraju. Szacuje się, że w tej metodzie na 1 Mg ciekłej stali powstaje ok. 8–15⁵ kg szlamu. Odpad ten charakteryzuje duża zawartość żelaza (głównie tlenki żelaza), niewielki stopień zanieczyszczenia olejami, alkaliami, cynkiem i ołowiem, bardzo drobne uziarnienie oraz wysoki stopień uwodnienia^{1–3}. Szlam, najczęściej jako aglomerat, jest cennym materiałem do pieców hutniczych^{1–3, 6–11}. W poszukiwaniu nowych sposobów przygotowania do utylizacji żelazonośnych odpadów hutniczych², w tym szlamu konwertorowego, zwrócono uwagę na proces kompaktowania w prasie walcowej ze względu na zalety urządzenia^{8–11}, jak i metody. W tym przypadku gładka powierzchnia robocza walców jest łatwiejsza i tańsza do wykonania oraz zapewnia dłuższy czas jej eksploatacji niż powierzchnia walców do brykietowania.

Celem badań było uzyskanie trwałego i wytrzymałego aglomeratu (wypraski) ze szlamu konwertorowego poprzez kompaktowanie go w prasie walcowej.

Część doświadczalna

Surowce

Do badań użyto szlamu konwertorowego z mokrego odpylania gazów ze stalowni konwertorowo-tlenowej o zawartości wody 25–30%, gęstości fazy stałej zawiesiny 4,3 g/cm³ i uziarnieniu 0–0,1 mm (85% ziaren < 0,036 mm), który po odwodnieniu w prasie filtracyjnej miał postać placków i wilgotność 12,5–18,5%. Głównymi składnikami szlamu¹¹ były: Fe₂O₃ 73–87,3%, Fe 62,1–67,1%, FeO 3–15,5%, CaO 1,9–6,8%, SiO₂ 0,9–5,3%, MnO 0,8–1,4% oraz ZnO < 1%. Lepiszczem było wapno pokarbidowe¹² (odpad z produkcji acetyleny) o wilgotności 44,5% i uziarnieniu < 1 mm oraz melasa (produkt uboczny produkcji cukru) o Ck 50, pH 8,1 i gęstości 73°Bx.

Aparatura

Aglomerację wykonano w prasie walcowej LPW 450 z gładką powierzchnią¹³ roboczą walców o średnicy 450 mm



Dr hab. inż. Andrzej JANEWICZ, prof. AGH (ORCID: 0000-0003-4233-5530), w roku 1989 ukończył studia na Wydziale Maszyn Górniczych i Hutniczych AGH w Krakowie. Pracuje na stanowisku profesora uczelni w Katedrze Systemów Wytwarzania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki tej samej uczelni. Specjalność – inżynieria mechaniczna.



Dr hab. inż. Bogdan KOSTURKIEWICZ, prof. AGH (ORCID: 0000-0002-4261-7901), w roku 1987 ukończył studia na Wydziale Maszyn Górniczych i Hutniczych AGH w Krakowie. Pracuje na stanowisku profesora uczelni w Katedrze Systemów Wytwarzania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki tej samej uczelni. Specjalność – inżynieria mechaniczna.

* Adres do korespondencji:

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (12) 617-24-95, fax: (12) 617-031-33, e-mail: janewicz@agh.edu.pl

i szerokości 76 mm oraz grawitacyjnym lub ślimakowym¹⁴⁾ dozownikiem nadawy.

Do pomiaru wartości nacisku na powierzchni roboczej pierścienia stosowano czujnik konstrukcji AGH złożony z tensometrów czynnych i kompensacyjnych (HBM-1-LY11-6/120) w układzie pełnego mostka. Moment skręcający na wale prasy oraz na wale ślimaka mierzone pełnomostkowymi układami tensometrów (HBM-1-LY11-10/350) naklejonymi na powierzchnie odpowiednich wałów. W układach pomiarowych stosowano zestawy telemetryczne MT-2555A i wzmacniacze EV-2510A oraz KMN-602A (HBM). Prędkość obrotową ślimaka mierzone prądniczką tachometryczną EF.66.2.16 (Deuta-Werke). Do pomiaru szerokości szczeliny między walcami użyto przetwornika LVDT PTx20 (Peltron). Gęstość aglomeratu wyznaczano metodą hydrostatyczną, stosując wagę analityczną Vibra AJH 420CE. Wytrzymałość wyprasek na zrzut wyznaczono, ważąc je przed i po zrzutach na wadze WTE-200. Wilgotność próbek oznaczano metodą wagową, stosując laboratoryjną suszarkę SPT-200 i wagę analityczną Vibra AJH 420CE. Akwizycję danych w języku LabView, opartym na sterownikach NI DAQmx, wykonano przez modułowy zestaw NI SCXI, kontroler NI-USB-6259 (National Instruments) oraz komputer PC.

Metodyka badań

Rozkruszone placki filtracyjne szlamu (ok. 100 kg) uśredniono w mieszarce Wernera, a w mieszarce zetowej przygotowano kolejne nadawy, susząc (80°C) i mieszając porcje 6–7 kg szlamu z dodatkiem wapna pokarbidowego i melasy. Doświadczalnie ustalono udział masowy każdego ze składników lepiszcza na 5–10%. Zależnie od czasu suszenia otrzymano mieszanki o wilgotności 1,5–5%. Oznaczenie wilgotności wykonano metodą wagową, susząc próbki w temp. 105°C do stałej masy i kontrolując jej ubytek na wadze analitycznej.

Przygotowane próbki kompaktowano z prędkością obwodową walców 0,2–0,5 m/s. W badaniach stosowano dozownik grawitacyjny, a szerokość szczeliny między walcami ustalono doświadczalnie na 3 mm. W kolejnych próbach stosowano dozownik ślimakowy. Eksperymentalnie określono prędkość obrotową ślimaka na 124 rpm oraz szczelinę między walcami na 5–6 mm.

Kryterium oceny aglomeratu była jego gęstość i wytrzymałość na zrzut po 168 h. W celach porównawczych do brykietowania¹¹⁾ z wyprasek przygotowano próbki, których dwa maksymalne wymiary 30 × 28 mm były zgodne z odpowiednimi wymiarami brykietów. Zrzuty wykonano w seriach po 10 sztuk, z wysokości 2 m, na płytę stalową o grubości 60 mm. Próby te powtarzano 3-krotnie, za każdym razem przesiewając pokruszoną masę przez sito o wymiarach oczka 18 × 18 mm. Rozmiar sita odpowiadał 2/3 średniej obliczonej z 2 maksymalnych wymiarów wypraski, zmierzonych we wzajemnie prostopadłych kierunkach. Gęstość wypraski określono metodą hydrostatyczną, ważąc próbki w wodzie.

Na podstawie zarejestrowanych charakterystyk czasowych momentu skręcającego na wale prasy oraz momentu skręcającego na wale ślimaka wyznaczono jednostkowe zapotrzebowanie na energię^{14, 15)} na realizację procesu kompaktowania. Do obliczeń wartości wyznaczanych wielkości stosowano zależności (1)–(3):

$$K_{168} = \frac{m_k}{m_p} 100\% \quad (1)$$

$$\rho_w = \frac{m_w \rho_c}{m_w - m_{wc}} \quad (2)$$

$$Z_K = \frac{N_k + N_s}{W_{mK}} = \frac{2M_w n_w + M_s n_s}{9,55 (3600 S B v_w \rho_w)} 10^6 \quad (3)$$

w których K_{168} oznacza wytrzymałość na zrzut po 168 h, %, m_p masę 10 sztuk aglomeratu przed zrzutami, g, m_k masę nadziarna na sicie, g, ρ_w średnią gęstość wypraski, g/cm³, m_w masę wypraski, g, ρ_c gęstość wody, g/cm³, m_{wc} masę wypraski w wodzie, g, Z_K jednostkowe zapotrzebowanie na energię, kWh/Mg, N_k moc pobraną przez silnik prasy, kW, N_s moc pobraną przez silnik ślimaka, kW, W_{mK} wydajność masową kompaktora, Mg/h, M_w moment skręcający wał walca prasy, kN·m, n_w prędkość obrotową wału walca prasy, rpm, M_s moment skręcający wał ślimaka, kN·m, n_s prędkość obrotową ślimaka, rpm, S grubość wypraski, mm, B szerokość walców, mm, a v_w prędkość obwodową walców, m/s.

Wyniki badań i ich omówienie

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że sposób dozowania nadawy do prasy miał decydujący wpływ na właściwości otrzymanego aglomeratu (rys. 1–3). W badanym zakresie wilgotności nadawy i prędkości walców jego gęstość dla dozowania grawitacyjnego wyniosła 3,105–3,395 g/cm³, a wytrzymałość na zrzut 42–56%, natomiast za pomocą ślimaka uzyskano odpowiednio 3,2–3,654 g/cm³ i 60–91%. Większej gęstości i wytrzymałości produktu przy dozowaniu ślimakowym odpowiadał wzrost nacisków jednostkowych, pomimo większej o 2–3 mm szerokości szczeliny między walcami niż przy podawaniu

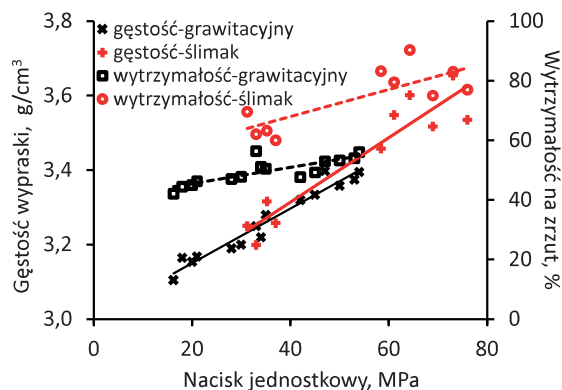


Fig. 1. Flakes density and drop resistance vs unit pressure and kind of feeder used

Rys. 1. Zależność gęstości i wytrzymałości aglomeratu od nacisku jednostkowego i sposobu dozowania nadawy

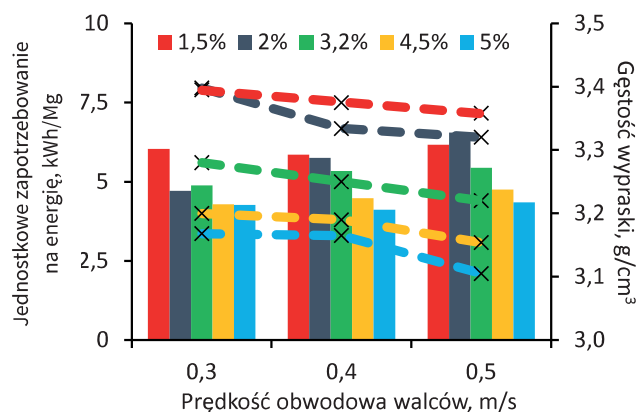


Fig. 2. Specific energy consumption and flakes density vs peripheral speed of the rollers and mixture moisture (gravity feeding)

Rys. 2. Zależność jednostkowego zapotrzebowania na energię i gęstości wypraski od prędkości walców i wilgotności mieszanki (dozowanie grawitacyjne)

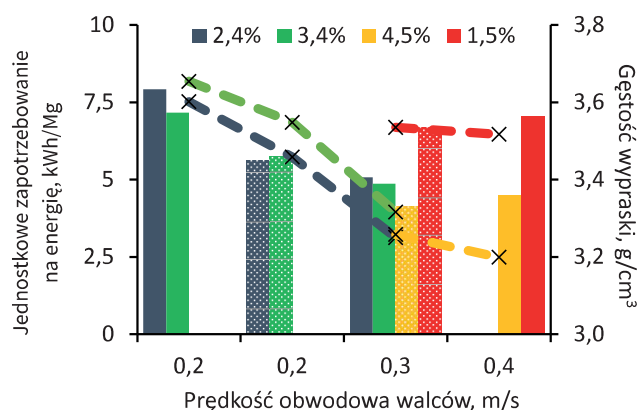


Fig. 3. Specific energy consumption and flakes density vs peripheral speed of the rollers, mixture moisture and width of the rollers gap: solid colour – gap 5 mm, light colour – gap 6 mm (screw feeding)

Rys. 3. Zależność jednostkowego zapotrzebowania na energię i gęstości wypraski od prędkości walców, wilgotności mieszanki i szerokości szczeliny między walcami: kolor jednolity – 5 mm, kolor jasny – 6 mm (dozowanie ślimakowe)

grawitacyjnym. Zarejestrowany nacisk podczas stosowania dozownika grawitacyjnego miał wartość 16–54 MPa, a dla aglomeracji za pomocą ślimaka 33–76 MPa. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię przy dozowaniu grawitacyjnym wyniosło 4,11–6,54 kWh/Mg, wykazując w badanym zakresie prędkości obwodowej walców niewielki trend wzrostowy, z wyjątkiem wilgotności 2,4%, gdzie wzrost ten był wyraźny, z 4,71 do 6,54 kWh/Mg. Dla dozowania ślimakowego jednostkowe zapotrzebowanie na energię wyniosło 4,13–7,92 kWh/Mg, a dla wilgotności nadawy 2,4% i 3,4%

wystąpił trend spadkowy tego wskaźnika ze wzrostem prędkości obwodowej walców i szerokości szczeliny między nimi. Dla wilgotności 1,5% i 4,5% zmniejszenie szczeliny między walcami (z 6 mm do 5 mm) przy jednoczesnym zwiększeniu ich prędkości (z 0,3 m/s do 0,4 m/s) spowodowało wzrost zapotrzebowania na energię o odpowiednio ok. 5% i 8,4%. Jednocześnie we wszystkich wykonanych próbach stwierdzono spadek wartości gęstości aglomeratu ze wzrostem prędkości obwodowej walców.

Podsumowanie

Wyniki badań potwierdziły, że w prasie walcowej można kompaktować szlam konwertorowy z melasą i wapnem pokarbidowym. Uzyskany aglomerat może być komponentem wsadu pieców hutniczych, jeżeli będzie miał wymaganą wytrzymałość mechaniczną^{10–12}). Aby spełnić ten warunek, należy zastosować dozownik ślimakowy, właściwie dobrać wilgotność nadawy, szerokość szczeliny między walcami oraz stosunek prędkości obrotowej ślimaka do prędkości walców prasy. Największą wartość wytrzymałości na zrzut 91%, spełniającą wymagania konwertora, uzyskano tylko dla jednej próby, co wskazuje na potrzebę dalszych badań. W zależności od opisanych warunków jednostkowe zapotrzebowanie na energię wynosiło 4,13–7,92 kWh/Mg, a gęstość wypraski 3,2–3,654 g/cm³.

Otrzymano: 23-09-2025

Zrecenzowano: 25-09-2025

Zaakceptowano: 29-09-2025

Opublikowano: 20-10-2025

LITERATURA

- [1] Pat. pol. 196270 B1, 2007.
- [2] Pat. pol. 246550 B1, 2025.
- [3] M. Niesler, B. Oleksiak, *Oddziaływanie przemysłu na środowisko naturalne. Cz. 1. Hutnictwo żelaza i stali*, IMŻ, Gliwice 2012.
- [4] M. Hetmański, K. Laskowski, M. Kulbacki, J. Kopeć, *Stal nisko- czy zero-emisyjna? Jak zdekarbonizować produkcję stali w Polsce*, Instrat Policy Paper, 2024.
- [5] World Steel Association 2024, *World steel in figures*, <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures>, dostęp 22.07.2025 r.
- [6] B. Das i in., *Resour. Conserv. Recycl.* 2007, **50**, 40.
- [7] H. Long, D. Liu, L.-J. Li, M.-H. Bai, Y. Jia, W. Qiu, [w:] *Recovery and utilization of metallurgical solid waste* (red. Y. Zhang), *IntechOpen* 2019, 787.
- [8] M. Niesler, *Prace IMŻ* 2009, **4**, 35.
- [9] M. Niesler, *Prace IMŻ* 2012, **3**, 46.
- [10] M. Hryniewicz, A. Janewicz, *Pol. J. Environ. Stud.* 2008, **17**, nr 3A, 235.
- [11] A. Janewicz, B. Kosturkiewicz, *Przem. Chem.* 2021, **100**, nr 9, 839.
- [12] A. Janewicz, *Przem. Chem.* 2024, **103**, nr 8, 902.
- [13] B. Kosturkiewicz, A. Janewicz, M. Hryniewicz, *Przem. Chem.* 2017, **96**, nr 9, 1873.
- [14] B. Kosturkiewicz, A. Janewicz, *Przem. Chem.* 2017, **96**, nr 8, 1690.
- [15] A. Lawrence, P. Thollander, M. Andrei, M. Karlsson, *Energies* 2019, **12**, 247.