

Instalacja do termicznego oczyszczania wiórów i pyłów aluminiowych z pozostałości po obróbce mechanicznej

Installation for thermal cleaning of aluminium chips and dust from machining processes

TOMASZ HARDY, WOJCIECH PLAZA

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.10.04

W artykule przedstawiono budowę oraz wyniki wstępnych badań obiektowych instalacji przeznaczonej do termicznego usuwania zanieczyszczeń organicznych z odpadowych frakcji aluminium pochodzących z procesów obróbki mechanicznej. Wcześniejsze doświadczenia potwierdzają możliwość skutecznego usuwania parafin technologicznych oraz emulsji chłodziwo-smarujących z wiórów i pyłu aluminium w kontrolowanych warunkach temperaturowych. W pracy zaprezentowano nowatorską przemysłową instalację z piecem obrotowym zasilanym palnikiem gazowym oraz przedstawiono wstępne wyniki jej weryfikacji. Uzyskane rezultaty potwierdzają wysoką skuteczność oczyszczania aluminium, a tym samym redukcję udziału frakcji lotnych, przy zachowaniu właściwości metalicznych aluminium oraz stabilnej pracy w trybie ciągłym w kontrolowanych warunkach termicznych. Przebieg odgazowania zanieczyszczeń organicznych silnie zależy od rodzaju zanieczyszczenia: w przypadku materiału zanieczyszczonego chłodziwem wystarczają temperatury procesu na poziomie około 300 °C, natomiast dla materiału zanieczyszczonego parafiną około 400 °C. Oznacza to, że dobór temperatury procesu nie może być przypadkowy i powinien wynikać zarówno z charakterystyki wsadu, jak i z wymaganej końcowej czystości materiału. W przypadku instalacji przemysłowej i materiału zanieczyszczonego chłodziwem ponad 66% frakcji lotnych uwalnianych jest już w temperaturze 270 °C. Przy obróbce wilgotnego materiału w temperaturze 300 °C w instalacji pilotowej uzyskano natomiast ubytek frakcji lotnych przekraczający 90%. Wyniki stanowią podstawę do dalszej optymalizacji procesu i oceny jego efektywności energetycznej i środowiskowej.

Słowa kluczowe: recykling aluminium, oczyszczanie termiczne, wióry i pył aluminiowy, emulsje chłodziwo-smarujące, piec obrotowy

The construction and preliminary on-site test results of an installation for the thermal removal of organic contaminants from waste aluminium fractions generated during mechanical processing are presented in the article. Previous laboratory studies confirmed the effective removal of technical paraffins and cooling-lubricating emulsions from aluminium chips and dust under controlled temperature conditions. The paper describes an industrial installation featuring an indirectly heated rotary drum reactor and presents results from its initial performance verification. The results confirm high efficiency in aluminium cleaning, achieving a significant reduction in volatile fractions while preserving aluminium's metallic properties, along with stable continuous operation under controlled thermal conditions. The degassing process strongly depends on contaminant type: for coolant-contaminated material, process temperatures around 300 °C are sufficient, whereas paraffin-contaminated material requires approximately 400 °C. This indicates that process temperature selection cannot be arbitrary and should be based on both feedstock characteristics and required final material purity. In the case of an industrial installation and a material contaminated with coolant, over 66% of volatile matter is released at a temperature as low as 270 °C. When treating wet material at 300 °C in a pilot plant, the loss of volatile fractions exceeded 90%. The findings provide a basis for further process optimization and assessment of its energy and environmental performance.

Keywords: aluminium recycling, thermal cleaning, aluminium swarf, cooling-lubricating emulsions, rotary kiln

Wprowadzenie

Aluminium należy do najważniejszych metali nieżelaznych wykorzystywanych w przemyśle ze względu na korzystny stosunek wytrzymałości do masy, wysoką

odporność korozyjną oraz możliwość wielokrotnego przetwarzania bez utraty właściwości materiałowych i użytkowych. Szczególne znaczenie praktyczne ma przy tym recykling aluminium, ponieważ produkcja aluminium wtórnego wymaga zdecydo-

wanie mniejszych nakładów energii niż wytwarzanie metalu pierwotnego, co przekłada się na ograniczenie zużycia surowców, emisji gazów cieplarnianych oraz obciążeń środowiskowych w całym cyklu życia materiału [1-3]. Jednocześnie

dr hab. inż. Tomasz Hardy, prof. uczelni ORCID: 0000-0003-1170-3820, Katedra Inżynierii Konwersji Energii, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Autor korespondencyjny: tomasz.hardy@pwr.edu.pl; Wojciech Plaza, prezes zarządu spółki KRATOS POLSKA Sp. z o.o., ul. Kolejowa 1, 46-040 Ozimek, wojciech.plaza@kratos.pl

Data zgłoszenia: 17.05.2026. Data przyjęcia: 10.09.2026. Data publikacji: 20.10.2026

znaczna część aluminium wykorzystywane go w przemyśle pochodzi obecnie z procesów recyklingu, co czyni ten metal jednym z kluczowych materiałów w gospodarce o obiegu zamkniętym [2, 4-6].

W praktyce przemysłowej istotnym strumieniem surowców wtórnych wykorzystywanych do produkcji nowych wyrobów są odpadowe frakcje aluminium powstające podczas obróbki mechanicznej, zwłaszcza wióry, drobne frakcje ziarniste oraz pyły. Materiały te mogą stanowić wartościowy wsad do dalszego wykorzystania metalurgicznego lub do wytwarzania specjalistycznych materiałów wtórnych, jednak ich przydatność technologiczna zależy między innymi od stopnia zanieczyszczenia powierzchni substancjami organicznymi.

Do najczęściej spotykanych zanieczyszczeń tego typu należą oleje obróbkowe, emulsje chłodząco-smarujące, chłodziwa olejowo-wodne oraz parafiny technologiczne stosowane pomocniczo w procesach kształtowania i obróbki skrawaniem materiału. Obecność tych substancji pogarsza warunki dalszego przetwarzania, ponieważ może zwiększać straty metalu w procesie przetopu, nasilać utlenianie powierzchni, pogarszać jakość stopu wtórnego, a także powodować emisję dymów i lotnych związków organicznych podczas ogrzewania materiału [7, 8]. Z tego względu odpowiednie przygotowanie odpadowych frakcji aluminium przed ich dalszym zagospodarowaniem stanowi jeden z kluczowych etapów technologii recyklingu, a rozwiązania poprawiające czystość różnych frakcji aluminium odpadowego wciąż są przedmiotem badań i wdrożeń technologicznych.

W zależności od rodzaju materiału i charakteru zanieczyszczeń stosuje się odolejanie mechaniczne, separację fizyczną, wymywanie, termiczne odparowanie oraz rozwiązania o charakterze pirolitycznym lub hybrydowym [7, 9, 10]. W przypadku drobnych frakcji aluminium szczególnego znaczenia nabiera takie prowadzenie procesu, aby skutecznie usunąć składniki organiczne, a jednocześnie nie doprowadzić do nadmiernego utlenienia metalu, lokalnych przegrzań ani pogorszenia bezpieczeństwa eksploatacji instalacji.

Skuteczność przygotowania złomu aluminiowego do ponownego wykorzystania zależy nie tylko od samego usunięcia zanieczyszczeń, ale także od stabilności procesu, jednorodności ogrzewania oraz sposobu zagospodarowania/unieszkodliwiania gazów odlotowych. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do drobnych frakcji, które ze względu na rozwiniętą powierzchnię właściwą, obecność wilgoci oraz skłonność do pylenia wymagają starannie dobranych parametrów

cieplnych i odpowiedniego układu oczyszczania gazów.

Oczyszczanie termiczne to jedna z metod usuwania organicznych substancji z powierzchni wiórów i pyłów aluminium przed ich dalszym przetwarzaniem. Badania laboratoryjne wskazują, że kontrolowany proces termiczny może skutecznie eliminować parafiny i emulsje, co przekłada się na poprawę jakości materiału do ponownego wykorzystania w procesach metalurgicznych lub w produkcji materiałów wtórnych, takich jak maty egzotermiczne, znajdujące zastosowanie np. w odlewnictwie jako elementy systemu wlewowego. Dzięki reakcjom egzotermicznym wydłużają one czas krzepnięcia metalu i poprawiają jakość odlewów. Skuteczne usunięcie z materiału zanieczyszczeń organicznych przyczynia się do ograniczenia dymienia i degradacji jakości produktów końcowych w procesach ich wytwarzania, co jest kluczowe zarówno pod względem technologicznym, jak i ekologicznym poprzez redukcję emisji zanieczyszczeń w procesach termicznej obróbki.

Mimo prezentowanych w literaturze metod termicznego odolejania [7, 9, 11] oraz wstępnego oczyszczania termicznego złomu aluminiowego do celów hutniczych [12], brak jest w literaturze danych operacyjnych i procesowych dotyczących termicznego oczyszczania bardzo drobnych frakcji aluminium (pyłów i wiórów o wymiarach $< 1,5$ mm) w skali przemysłowej, gdzie kluczowym problemem jest unikanie niekontrolowanego utleniania powierzchniowego metalu (powodującego straty metalicznego aluminium) przy jednoczesnym usuwaniu zanieczyszczeń organicznych. W niniejszej pracy zaprezentowano efekt wdrożenia i weryfikacji w skali przemysłowej innowacyjnego reaktora obrotowego z ogrzewaniem pośrednim, wykorzystującego ciekły stop eutektyczny ołowiu i bizmutu zawarty w dwuosobnym płaszczu komory roboczej. Takie rozwiązanie ogranicza ryzyko miejscowego przegrzania materiału, sprzyjając utrzymaniu izotermicznych warunków odgazowania zanieczyszczeń organicznych oraz stabilnej pracy układu dopalania gazów procesowych.

Celem pracy jest przedstawienie budowy oraz wyników badań obiektowych przemysłowej instalacji przeznaczonej do termicznego oczyszczania odpadowych frakcji wiórów aluminiowych zanieczyszczonych substancjami organicznymi pochodzącymi z obróbki mechanicznej. Praca łączy wyniki wcześniejszych badań laboratoryjnych i pilotowych z oceną funkcjonowania układu przemysłowego, co pozwala ocenić zarówno skuteczność usuwania części lotnych, jak

i praktyczne uwarunkowania wdrożenia tej technologii w skali technicznej.

Charakterystyka przetwarzanego materiału

Materiał odpadowy, wykorzystywany w firmie Kratos Polska Sp. z o.o., stanowi przemysłowy strumień odpadów (mieszanka pyłu i wiórów aluminiowych) pochodzących z obróbki mechanicznej elementów aluminiowych u zewnętrznych dostawców. Ze względu na rynkowy i odpadowy charakter surowca stanowi on mieszaninę różnych popularnych stopów aluminium i cechuje się różnym rodzajem oraz stopniem zanieczyszczenia [13].

Z punktu widzenia docelowego zastosowania oczyszczanego materiału, jakim jest produkcja egzotermicznych otulin i mat odlewniczych, dokładny skład stopowy aluminium ma znaczenie drugorzędne. O przydatności technologicznej oczyszczanego materiału w procesie wytwarzania i użytkowania mat egzotermicznych decydują następujące czynniki:

- a) zawartość zanieczyszczeń organicznych (chłodziw, olejów i parafin), która została skutecznie zredukowana w opisanym procesie termicznym. Zanieczyszczenia te powodują niekontrolowane dymienie i odgazowanie podczas zalewania formy odlewniczej u klientów, a ich eliminacja była głównym celem podjętych prac;
- b) wysoki udział aluminium w postaci metalicznej, wykazującego wysoką reaktywność w reakcji utleniania mat aluminiowych, co zapewnia wymagany efekt egzotermiczny;
- c) rozkład ziarnowy, a właściwie unikanie zbyt dużej zawartości drobnego pyłu, co przekłada się na ograniczenie unosu w uwalnianych gazach i zapobiega nadmiernemu utlenieniu powierzchniowemu najdrobniejszych frakcji podczas wygrzewania.

Proces termicznego oczyszczania jest prowadzony w zakresie temperatur 250-350 °C, co oznacza, że przebiega poniżej temperatury topnienia stopów aluminium. Ponieważ zakres ten mieści się w obszarze łagodnego wygrzewania, skład pierwiastkowy surowca nie ulega istotnym zmianom, a metaliczna postać aluminium zostaje zachowana w stopniu wystarczającym do celów technologicznych.

Przeprowadzone próby oczyszczania poprzez wymywanie zanieczyszczeń z badanego materiału wykazały niewielką skuteczność tego procesu [13]. Ponadto nie uniknięto w ten sposób konieczności termicznego wysuszenia materiału po jego wymywaniu. Przetwarzany materiał odpadowy jest wstępnie przesiewany na sicie

o rozmiarze 1,5 mm, głównie w celu odseparowania większych frakcji zanieczyszczeń. Tak przygotowany materiał ma gęstość nasypową w zakresie 480-530 kg/m³, zależnie od rodzaju zanieczyszczeń i zawartości wilgoci.

Badania laboratoryjne

We wstępnym etapie prac przeprowadzono badania laboratoryjne ukierunkowane na określenie zakresów temperatur niezbędnych do skutecznego usuwania zanieczyszczeń z odpadowych frakcji aluminium zanieczyszczonych substancjami organicznymi pochodzącymi z obróbki mechanicznej. Analizowano materiał zanieczyszczony chłodziwem oraz materiał zanieczyszczony parafiną technologiczną (rys. 1) [13].

Jednym z najbardziej widocznych efektów termicznego uwalniania frakcji lotnych jest intensywne dymienie obserwowane podczas ogrzewania próbek, co jest efektem niepożądanym z uwagi na dalszy proces wysokotemperaturowej obróbki wytwarzanych produktów. Zjawisko to występuje intensywnie po podgrzaniu materiału do temperatury powyżej 250 °C (rys. 1), co potwierdza, że obecność zanieczyszczeń organicznych może istotnie utrudniać dalszą wysokotemperaturową obróbkę materiału i uzasadnia konieczność jego wstępnego oczyszczania.



Rys. 1. Próbkę materiału surowego, próbki umieszczone w komorze pieca laboratoryjnego oraz widoczne zadymienie komory pieca w temperaturze 300 °C

Fig. 1. Raw material samples, samples placed in the laboratory furnace chamber, and visible fuming inside the chamber at 300 °C

Gazy uwalniane podczas termicznego oczyszczania zanieczyszczanego aluminium odpadowego mogą zawierać m.in. CO₂, CO i lotne związki organiczne (LZO) [9, 11], a udział poszczególnych składników zależy od rodzaju zanieczyszczeń. W celu minimalizacji emisji zanieczyszczeń do atmosfery w instalacjach przemysłowych stosuje się zwykle dopalanie lub utlenianie katalityczne, aby ograniczyć emisję związków palnych [14].

W celu identyfikacji głównych składników gazowych uwalnianych podczas wygrzewania badanych materiałów w powietrzu wykonano pomiary składu gazu na wylocie z komory pieca mufowego,

wykorzystując analizator Gaset DX4000. Badania te miały charakter rozpoznawczy i nie wskazywały docelowych stężeń poszczególnych składników z uwagi na bardzo duże rozcieńczenie gazu powietrzem. Stwierdzono obecność w gazie odlotowym przede wszystkim tlenku węgla oraz lekkich węglowodorów, takich jak metan, etan, propan i toluen, przy czym wyższe stężenia tych składników obserwowano dla materiału zanieczyszczanego parafiną niż dla materiału zanieczyszczanego chłodziwem. Zmierzone wartości chwilowe przedstawiono w tabeli 1. Uzyskane wyniki potwierdzają, że termiczne usuwanie zanieczyszczeń organicznych wiąże się z emisją związków palnych oraz lotnych związków organicznych, które powinny być uwzględnione przy projektowaniu układu wentylacji i oczyszczania gazów procesowych. Skład gazu wskazuje na możliwość jego łatwego doczyszczania w procesie dopalania.

Ubytek masy próbek w zależności od temperatury analizowano metodą termogravimetryczną. Badania wykonano z wykorzystaniem analizatora ELTRA Thermstep (rys. 2), a przedstawione wartości utraty masy stanowią średnie z pięciu próbek dla każdego badanego materiału. Próbkę były wstępnie suszone, a następnie określano ubytek masy w danej temperaturze w atmosferze azotu. Masa każdej próbki

materiału poddawanej wygrzewaniu wynosiła około 1 g, a czas przetrzymywania próbki w danej temperaturze był związany z osiągnięciem stałej masy.

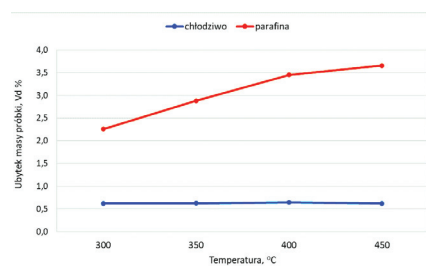


Rys. 2. Badania laboratoryjne odgazowania zanieczyszczeń organicznych z pyłu i wiórów aluminium

Fig. 2. Laboratory research on the volatilization extent of organic impurities from aluminium dust and chips

Wyniki badań wykazały, że dla materiału zanieczyszczanego chłodziwem główny ubytek części lotnych zachodził do temperatury około 300 °C, a dalsze zwiększanie temperatury nie powodowało już istotnego spadku masy próbki (rys. 3). Odmienne przebiegi obserwowano dla materiału zanieczyszczanego parafiną technologiczną, dla którego wzrost utraty masy obserwowano także w temperaturach przekraczających 400 °C. Oznacza to, że temperatura procesu oczyszczania powinna być doбираana nie tylko do rodzaju odpadowej frakcji aluminium, ale również do rodzaju i właściwości usuwanych zanieczyszczeń.

Wyniki uzyskane w skali laboratoryjnej miały kluczowe znaczenie dla dalszych etapów prac, ponieważ umożliwiły wstępne określenie zakresów temperatur wymaganych do skutecznego usuwania zanieczyszczeń organicznych. Stanowiły także podstawę do doboru parametrów pracy i zaprojektowania instalacji przemysłowej.



Rys. 3. Ubytek masy próbki zanieczyszczanej chłodziwem i parafiną w wybranych temperaturach
Fig. 3. Mass loss of a coolant- and paraffin-contaminated sample at selected temperatures

Badania instalacji pilotowej

W celu weryfikacji skuteczności termicznego oczyszczania wiórów aluminium podawanych do komory roboczej w większej objętości niż podczas badań laboratoryjnych wykonano badania na

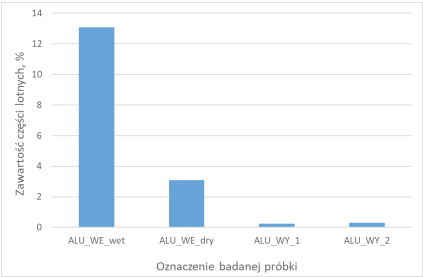
Tabela 1. Wyniki badania składu powietrza wentylującego komorę pieca w trakcie wygrzewania próbek zanieczyszczanego aluminium
Table 1. Results of the study on the composition of ventilation air in the furnace chamber during the heating of contaminated aluminium samples

Składnik gazu	Jednostka	Rodzaj zanieczyszczenia	
		parafina	chłodziwo
O ₂	%	20,01	20,20
NH ₃	mg/Nm ³	2	1
CH ₄	mg/Nm ³	35	1
C ₂ H ₆	mg/Nm ³	71	3
C ₃ H ₈	mg/Nm ³	167	16
C ₇ H ₈	mg/Nm ³	103	21
CO	mg/Nm ³	197	10
SO ₂	mg/Nm ³	63	0
H ₂ O	%	0,5	0,4

stanowisku prototypowym, umożliwiającym przetwarzanie do kilku kilogramów materiału na godzinę, przy temperaturze procesu do 400 °C. Badany materiał był podawany za pośrednictwem dozownika ślimakowego do obrotowej komory roboczej o średnicy 300 mm i długości 500 mm. Komora była ogrzewana za pomocą palnika olejowego o mocy 20 kW, przy czym realizowany proces miał charakter okresowy, to znaczy komora robocza była okresowo opróżniana i ponownie załadowywana.

Z uwagi na fakt, że docelowo w firmie Kratos najczęściej wykorzystywany będzie materiał zanieczyszczony chłodziwem, właśnie taki materiał wykorzystano w testach. Uwalniające się w komorze gazy były wyprowadzane na zewnątrz, a ich skład kontrolowano przy użyciu analizatora Sensonic 6000. Średni udział CO w gazie wynosił 3,2%, udział węglowodorów (C_xH_y) 0,4%, udział CO_2 5,5%, natomiast udział O_2 wynosił 7,2%. Pobraną w trakcie testów próbkę gazową poddano także analizie chromatograficznej GC-FID (HP6890) w celu identyfikacji związków węglowodorowych. Całkowity udział węglowodorów w gazie był niski i nie przekroczył 0,5% przy udziale metanu na poziomie około 0,1%. Wśród głównych składników stwierdzono także obecność etanu, etylenu oraz związków C_3 i C_4 (związki typu propan, butan i ich izomery). Warto odnotować, że gdyby założyć jako jedyne składniki palne w gazie C_3H_8 z maksymalnym udziałem 0,5% oraz maksymalny udział CO wynoszący 4%, to wartość opałowa takiego gazu byłaby na poziomie ok. 1 MJ/m³, co wskazuje na konieczność jego dopalania w palniku zasilanym paliwem pomocniczym w celu minimalizowania emisji tych zanieczyszczeń do atmosfery.

Na rys. 4 porównano wyniki badania udziału frakcji lotnych w materiale zanieczyszczonym (ALU-wejściowy) oraz w materiale po termicznym oczyszczeniu (ALU-wyjściowy). Procedura badawcza do określania szczątkowej pozostałości części lotnych obejmowała nagrzew próbki od temp. otoczenia do temp. 500 °C (dużo wyższej niż temp. procesu w instalacji pilotowej) przez 25 minut oraz przetrzymanie w tej temperaturze przez 15 minut. Materiał surowy charakteryzował się dużą zawartością wilgoci wynoszącą ok. 10% (określaną standardowo w temp. 105 °C). Proces jego wygrzewania pozwolił jednak na zmniejszenie zawartości części lotnych z 3% suchej masy (ALU-WE_dry) w materiale wejściowym do wartości poniżej 0,3% w materiale wyjściowym, co wskazuje na wysoką skuteczność procesu sięgającą 90%.

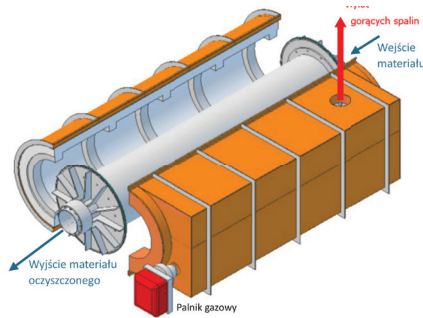


Rys. 4. Zmiany masy próbek aluminium zanieczyszczonego (materiał wejściowy w stanie roboczym i suchym) oraz po prażeniu w temperaturze 300 °C (materiał wyjściowy)
Fig. 4. Changes in the mass of contaminated aluminium samples (inlet material in its as-received and dry state) and after calcination at 300 °C (outlet material)

Budowa i testy instalacji przemysłowej

Mając na uwadze wyniki badań laboratoryjnych oraz pilotowych, firma Kratos Polska Sp. z o.o. podjęła decyzję o budowie instalacji termicznego oczyszczania pyłu aluminiowego. Zasadniczym elementem prototypowej instalacji jest obrotowy, cylindryczny bęben ze stali nierdzewnej, ogrzewany pośrednio spalinami ze spalania gazu ziemnego, projektu firmy APLITERM z Wrocławia. Nowością rozwiązania jest zastosowanie dwuściennej konstrukcji bębna, wypełnionej odpowiednio dobranym stopem ołowiu i bizmutu, który w temperaturze procesu pozostaje w stanie płynnym. Takie rozwiązanie powoduje równomierny rozkład temperatury na wewnętrznej ścianie bębna i zapobiega miejscowym przegrzaniom materiału. Taka konstrukcja była już z powodzeniem stosowana w instalacji zgazowania odpadów [15]. Metal w postaci ciekłej stanowi jednocześnie akumulator ciepła podczas okresowego wyłączania urządzenia. Instalacja umożliwia pracę w trybie ciągłym przy wydajności 150 kg/h i w zakresie temperatur pracy 250-350 °C. Wybrane parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne instalacji zestawiono w tabeli 2.

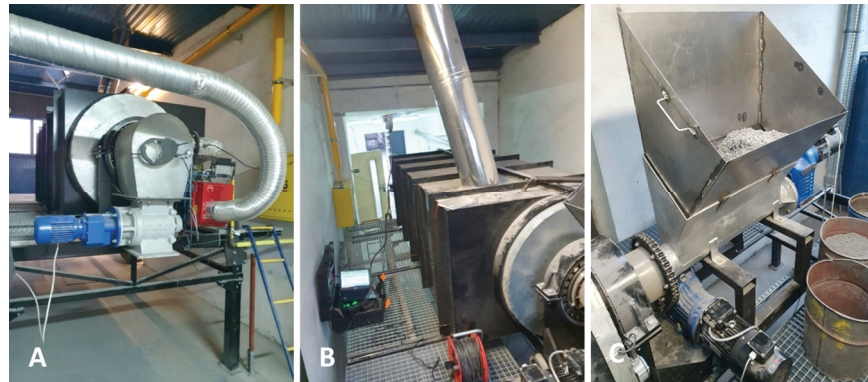
Komora robocza jest zamontowana w pozycji nachylonej względem poziomu o kilka stopni, co wymusza przemieszczanie się materiału wzdłuż osi bębna. Szczelność komory roboczej reaktora bębnowego zapewniają uszczelnienia dławikowe na wlocie i wylocie oraz układy podawania i odbioru surowca (podajnik ślimakowy na wlocie oraz dozownik celkowy na wylocie). Kontrola temperatury realizowana jest za pomocą termopar typu K (klasa 1, błąd pomiaru ±1,5 °C) umieszczonych bezpośrednio w komorze reaktora oraz w obrotowym płaszczu z ciekłym stopem. Podczas rozruchu instalacji przewidziano wstępną inertyzację komory roboczej, natomiast w trakcie pracy ciągłej przestrzeń ta wypełnia się uwalnianymi gazami procesowymi (w tym parą wodną), co ogranicza niekontrolowany dostęp powietrza i ryzyko powstania atmosfery wybuchowej. W celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy instalacji na wylocie z komory roboczej monitorowane jest stężenie tlenu, a przekroczenie założonej wartości dopuszczalnej uruchamia automatyczny system awaryjnej inertyzacji poprzez podanie azotu. Gazy uwalniane w komorze roboczej kierowane są do komory spalania w celu ich dopalenia w przystosowanym do tego palniku gazowym o mocy 75 kW (rys. 5, 6 i 8).



Rys. 5. Budowa instalacji termicznej z obrotową komorą roboczą [DTR]
Fig. 5. Design of a thermal installation with a rotary working chamber [O&M documentation]

Tabela 2. Zestawienie podstawowych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych instalacji
Table 2. Summary of the basic construction and operational parameters of the installation

Parametr techniczny	Jednostka	Wartość
Wydajność masowa nominalna	kg/h	150
Wydajność masowa maksymalna	kg/h	250
Temperatura pracy komory	°C	250–350
Średnica wewnętrzna bębna	mm	600
Długość robocza bębna	mm	3000
Kąt nachylenia bębna	°	2–4
Prędkość obrotowa bębna	obr./min	1–2
Nośnik ciepła w płaszczu	-	stop Pb-Bi
Moc nominalna palnika gazowego (gaz E)	kW	75
Zapotrzebowanie na moc elektryczną (potrzeby własne)	kW	5
Podciśnienie w komorze roboczej	Pa	5–20



Rys. 6. Widok instalacji podczas badań testowych: a) strona wylotu oczyszczonego materiału, b) strona podawania materiału do komory, c) układ podawania materiału
Fig. 6. View of the installation during test trials: a) outlet side of the cleaned material, b) view from the side of feeding raw material into the chamber, c) material feeding system

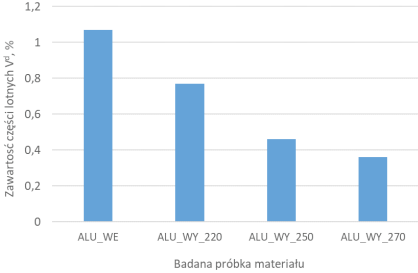
W celu określenia skuteczności procesu oczyszczania wiórów aluminiowych wykonano badania pracy instalacji przy różnych temperaturach komory obrotowej (rys. 6). Testy obiektowe przeprowadzono dla dostępnego wówczas materiału zanieczyszczonego chłodziwem. Do badań pobrano próbki materiału opuszczającego reaktor podczas pracy reaktora w temperaturach 220 °C, 250 °C i 270 °C oraz próbkę materiału surowego (materiał wsadowy poddawany oczyszczaniu).

Pobrane próbki materiałów poddano następnie prażeniu w temperaturze 400 °C (znacznie wyższej niż w trakcie testu obiektowego), aby określić szcztątkową zawartość części lotnych. Pozwoliło to na ilościową ocenę efektywności procesu oczyszczania – przy 270 °C udział frakcji lotnych spadł do 0,36% w badanym materiale (zgodnie z tabelą 3). Jednocześnie wykazano, że tak oczyszczony materiał nie wykazuje tendencji do intensywnego dymienia podczas ponownego ogrzewania, co eliminuje kluczowy problem technologiczny.

Tabela 3. Wyniki badań wpływu temperatury procesu na stopień wydzielania frakcji lotnych
Table 3. The effect of process temperature on the degree of volatile fractions release

Badany materiał	Udział frakcji lotnych Vd [%]
węsciowy (zanieczyszczony)	1,07
po procesie w temp. 220 °C	0,77
po procesie w temp. 250 °C	0,46
po procesie w temp. 270 °C	0,36

Na uwagę zasługuje fakt, że podczas testów wykorzystany materiał cechował się wysoką zawartością wilgoci wynoszącą 14,3% (znacznie większą niż w próbach wykorzystywanych we wcześniejszych badaniach laboratoryjnych), co przekładało się również na wysoką zawartość wilgoci w gazie wylotowym.



Rys. 7. Wyniki badań wpływu temperatury procesu na stopień wydzielania frakcji lotnych
Fig. 7. Results of studies on the effect of process temperature on volatile fraction release

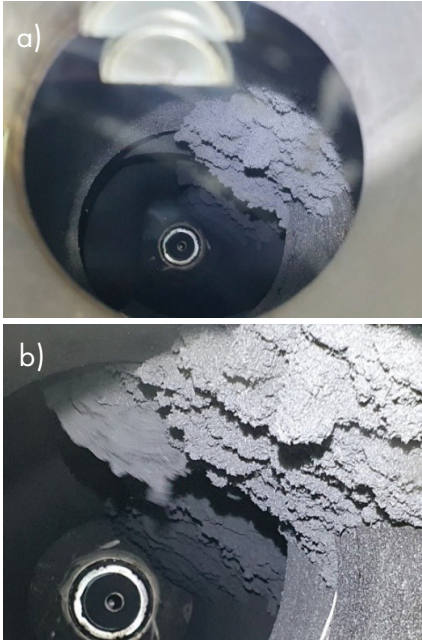
Pomiary zapylenia gazów wylotowych z reaktora (będących efektem prażenia zanieczyszczonego materiału), wykonane metodą grawimetryczną, wykazały w trakcie testów wartość średnią na poziomie 9 mg/Nm³, natomiast średnie stężenie LZO, zmierzone z wykorzystaniem metody płomieniowo-jonizacyjnej FID, wynosiło 360 mg/Nm³. Gazy procesowe wyprowadzane z obrotowej komory roboczej skierowano do komory dopalania. Skład spalin wylotowych w trakcie testów eksploatacyjnych oznaczono z wykorzystaniem analizatora TESTO 350. Analizowany strumień spalin stanowił mieszaninę produktów spalania gazu ziemnego oraz dopalania substancji lotnych uwalnianych z oczyszczanego materiału.

Wyniki zestawione w tabeli 4 przedstawiają wartości uśrednione z serii pomiarowych realizowanych przy zmiennym obciążeniu cieplnym palnika gazowego, uporządkowane względem temperatury spalin i udziału tlenu w spalinach. Wstępne wyniki pomiarów wskazują, że wprowadzenie gazów odlotowych z reaktora do strefy spalania nie powodowało drastycznych zakłóceń w pracy palnika ani istotnego wzrostu mierzonych stężeń zanieczyszczeń. Zaobserwowane trendy sugerują stabilną pracę układu dopalania w analizowanym zakresie obciążeń. Jednocześnie można wskazać na wysoką temperaturę na

wylocie z komory spalania. Temperatura spalin przekraczała 470 °C przy utrzymywaniu temperatury w komorze roboczej na poziomie ok. 270 °C, co oznacza, że przy konieczności podniesienia temperatury komory do temperatury powyżej 300 °C (np. przy oczyszczaniu aluminium z parafiny) temperatura spalin będzie jeszcze wyższa. Spowodowało to konieczność podawania zimnego powietrza do kanału spalin, aby obniżyć temperaturę spalin przed wentylatorem wylotowym. Stanowiło to też podstawę do podjęcia decyzji o obniżeniu mocy cieplnej palnika gazowego kosztem wydłużenia czasu wygrzewania komory roboczej do założonej temperatury jej pracy.

Tabela 4. Skład spalin na wylocie z komory spalania
Table 4. Flue gas composition at the outlet of the combustion chamber

Lp.	O ₂ [%]	CO [mg/Nm ³]	CO ₂ [%]	NO _x [mg/Nm ³]	Temp. spalin °C
1	8,74	2	7,00	90	356
2	8,64	2	7,00	94	372
3	7,51	5	7,58	98	396
4	6,59	19	8,09	103	457
5	5,77	40	8,56	107	475



Rys. 8. Widok wnętrza komory roboczej z widoczną warstwą oczyszczanego aluminium
Fig. 8. View of the interior of the working chamber with the visible layer of processed aluminium

W przypadku przetwarzania pyłu aluminiowego charakteryzującego się znacznym udziałem subfrakcji poniżej 0,1 mm oraz wyraźnym porywaniem drobnego pyłu przez strumień gazów procesowych (gdzie zapylenie gazu przekracza 15 mg/Nm³) przewidziano alternatywną ścieżkę odprowadzania gazów

wylotowych do dodatkowego układu oczyszczania z pominięciem komory dopalania termicznego. Analiza rozkładu ziarnowego pyłu, wykonana z użyciem optycznego analizatora Malvern Mastersizer, wykazała, że blisko 90% cząstek unoszonych wraz z gazem mieści się w przedziale od 10 µm do 50 µm. W takich warunkach oczyszczanie gazów może być realizowane w pionowym skrubierze natryskowym, opcjonalnie wyposażonym w moduł filtrów z węglem aktywnym. Zastosowanie tego rozwiązania pozwala także skutecznie ograniczyć problem podwyższonej zawartości pary wodnej w gazie odlotowym, co jest charakterystyczne dla niektórych partii surowca o podwyższonej wilgotności.

Wnioski

Przeprowadzone badania w skali laboratoryjnej, pilotowej oraz przemysłowej potwierdziły wysoką skuteczność opracowanej technologii termicznego oczyszczania odpadowych frakcji aluminium (wiórów i pyłów o wymiarach < 1,5 mm) z zanieczyszczeń organicznych pochodzących z procesów obróbki mechanicznej. Zastosowanie innowacyjnego reaktora obrotowego z ogrzewaniem pośrednim (zaprojektowanego przez firmę APLITERM), wykorzystującego ciekły stop eutektyczny Pb-Bi w dwuściennym płaszczu komory roboczej, zapewniło izotermiczne warunki prowadzenia procesu i ograniczyło ryzyko miejscowego przegrzewania wsadu. Umożliwiło to stabilną pracę instalacji w trybie ciągłym z nominalną wydajnością 150 kg/h oraz skuteczne usunięcie substancji lotnych przy jednoczesnym ograniczeniu ryzyka utleniania powierzchniowego metalicznego aluminium.

Przebieg odgazowania zanieczyszczeń organicznych zależy silnie od rodzaju zanieczyszczenia. W przypadku materiału zanieczyszczonego emulsją chłodząco-smarującą, w warunkach instalacji przemysłowej uzyskano redukcję frakcji lotnych na poziomie ponad 66% w temperaturze 270 °C, natomiast w instalacji pilotowej, przy temperaturze 300 °C, ubytek ten przekraczał 90%. Z kolei w przypadku materiału zanieczyszczonego parafinami technologicznymi, efektywne usunięcie zanieczyszczeń organicznych wymaga podniesienia temperatury procesu do około 400 °C, przy czym w wyższych temperaturach rejestrowany jest jeszcze nieznaczny dalszy ubytek masy próbki.

Praktycznym efektem przeprowadzonych badań było uzyskanie aluminium o właściwościach umożliwiających jego dalsze wykorzystanie jako surowca do produkcji otulin i mat egzotermicznych stosowanych w odlewnictwie. Otrzymane wyniki potwierdzają zasadność rozwijania technologii termicznego oczyszczania odpadowych frakcji aluminium nie tylko z punktu widzenia recyklingu materiałowego, lecz także w kontekście przygotowania wsadu do specjalistycznych zastosowań przemysłowych. Kluczowym elementem jest tu skuteczne usunięcie zanieczyszczeń organicznych, co eliminuje dymienie (mogące powodować wady odlewnicze) przy jednoczesnym zachowaniu metalicznej postaci aluminium oraz odpowiedniego rozkładu ziarnowego.

Kierunki dalszych prac badawczo-rozwojowych obejmują doprecyzowanie wpływu czasu przebywania materiału w reaktorze, temperatury procesu oraz rodzaju zanieczyszczeń na końcową zawartość części lotnych, a także wykonanie pogłębionej oceny energetycznej i środowiskowej instalacji. Istotnym elementem przyszłych analiz będzie również porównanie skuteczności dopalania termicznego oraz mokrego oczyszczania gazów w kontekście ich jednostkowego zużycia energii, ograniczania emisji zanieczyszczeń oraz niezawodności eksploatacyjnej całego układu.

Źródło finansowania

Projekt „Badania w firmie KRATOS Polska Sp. z o.o. nad opracowaniem technologii oczyszczania aluminium pochodzącego z procesów obróbkowych w celu wykorzystania do produkcji otulin egzotermicznych” był współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Opolskiego na lata 2014-2020, Oś priorytetowa 01 – Innowacje w gospodarce, Działanie 01.01 – Innowacje w przedsiębiorstwach.

Literatura

- [1] European Aluminium. (2018). Environmental profile report 2018: Life-cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe.
- [2] International Aluminium Institute. (2019). Global aluminium recycling: A cornerstone of sustainable development.
- [3] Schlesinger, M. E. (2013). Aluminum recycling (2nd ed.). CRC Press. DOI: 10.1201/b16192.

- [4] Raabe, D., Ponge, D., Uggowitzer, P.J., Roscher, M., Paolantonio, M., Liu, C., Antrekowitsch, H., Kozeschnik, E., Seidmann, D., Gault, B., De Geuser, F., Deschamps, A., Hutchinson, C., Liu, C., Li, Z., Prangnell, P., Robson, J., Shanthiraj, P., Vakili, S., ... Pogatscher, S. (2022). Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys. Progress in Materials Science, 128, Article 100947. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2022.100947.
- [5] Al-Alimi, S., Yusuf, N. K., Ghaleb, A. M., Lajis, M. A., Shamsudin, S., Zhou, W., Altharan, Y. M., Abdulwahab, H. S., Saif, Y., Didane, D. H., S T T, I., & Adam, A. (2024). Recycling aluminium for sustainable development: A review of different processing technologies in green manufacturing. Results in Engineering, 23, Article 102566. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102566.
- [6] Pereira, A. C. (2025). Aluminum scrap recycling for foundry alloys: Review of technological advances and circular economy challenges. Revista DCS, 22(84), 1–42. DOI: 10.54899/dcs.v22i84.3867.
- [7] Reuter, M. A., Hudson, C., van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers, C., & Hagelüken, C. (2013). Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure. United Nations Environment Programme.
- [8] Cui, J., & Roven, H. J. (2010). Recycling of automotive aluminum. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20(11), 2057–2063. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60417-9.
- [9] Palimka, P. (2020). Thermal cleaning and melting of fine aluminium alloy chips. Archives of Foundry Engineering, 20(4), 91–96. DOI: 10.24425/afe.2020.133353.
- [10] Chen, X., Saada, M. B., Lavis, B., & Ammar, A. (2025). Recent advances in the remelting process for recycling aluminium alloy chips: A critical review. International Journal of Material Forming, 18, Article 42. DOI: 10.1007/s12289-025-01904-9.
- [11] Vallejo-Olivares, A., Gertjergdes, T., Hågåsén, S., Friedrich, B., & Tranell, G. (2024). Effects of compaction and thermal pre-treatments on generation of dross and off-gases in aluminium recycling. Journal of Sustainable Metallurgy, 10, 69–82. DOI: 10.1007/s40831-023-00773-3.
- [12] Chmielarz, A., Wężyk, W., Kamiński, K., Bratek, Ł., & Malec, W. (2007). Najlepsze dostępne techniki (BAT): Wytyczne dla produkcji i przetwórstwa metali nieżelaznych. Ministerstwo Środowiska.
- [13] Hardy, T., & Plaza, W. (2026). Ocena efektywności termicznego oczyszczania wiórów i pyłu aluminium z zanieczyszczeń olejowo-emulsyjnych po obróbce skrawaniem. Rynek Energii, 3(184).
- [14] Green, J. A. S. (Ed.). (2007). Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability. ASM International.
- [15] Sitka, A., Szulc, P., Smykowski, D., & Jodkowski, W. (2021). Application of poultry manure as an energy resource by its gasification in a prototype rotary counterflow gasifier. Renewable Energy, 175, 422–429. DOI: 10.1016/j.renene.2021.04.126

INSTAL