

Strona czasopisma: <http://analit.agh.edu.pl/>

# Ołów w przemyśle: od produkcji do bezpiecznego zagospodarowania odpadów

## *Lead in Industry: From Production to Safe Waste Management*

Julia Węgrzyniak

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

**ABSTRAKT:** Ołów jest metalem ciężkim, który odegrał istotną rolę w historii rozwoju przemysłu. Znany i wykorzystywany już w starożytności, zawdzięcza swoją popularność właściwościom takim jak niska temperatura topnienia, duża gęstość, dobre właściwości odlewnicze oraz łatwość tworzenia stopów z innymi metalami. Obecnie jego zastosowanie podlega restrykcjom ze względu na wysoką toksyczność pierwiastka, jednak nadal pozostaje on kluczowym surowcem w wybranych gałęziach techniki. W artykule omówiono pełny cykl życia ołowiu – od jego pozyskiwania z rud siarczkowych, poprzez zastosowania przemysłowe, aż po emisję i gospodarkę odpadami w kontekście recyklingu. Przedstawiono również toksykologiczny wpływ ołowiu na organizm człowieka, w tym objawy i skutki ołowicy, a także współczesne metody jej diagnostyki laboratoryjnej oraz leczenia.

**ABSTRACT:** Lead is a heavy metal that has played a significant role in the history of industrial development. Known and utilized since antiquity, it owes its popularity to properties such as a low melting point, high density, excellent casting characteristics, and the ease with which it forms alloys with other metals. Today, its use is restricted due to the element's high toxicity; however, it remains a crucial raw material in selected branches of technology. This article discusses the full life cycle of lead—from its extraction from sulfide ores, through industrial applications, to emissions and waste management in the context of recycling. It also presents the toxicological impact of lead on the human body, including the symptoms and effects of lead poisoning (plumbism), as well as contemporary methods of its laboratory diagnosis and treatment.

**Słowa kluczowe:** algorytmy genetyczne, funkcje sklejjane, woltamperometria, funkcje sklejjane

### 1. Wstęp

Ołów jest pierwiastkiem chemicznym należącym do 14. grupy układu okresowego, oznaczonym symbolem Pb (łac. Plumbum) i liczbą atomową 82. W stanie czystym jest metalem o matowej, szarej barwie oraz dużej gęstości wynoszącej 11.34 g/cm<sup>3</sup>. Specyficzne właściwości fizykochemiczne tego pierwiastka sprawiają, że od stuleci stanowi on ceniony surowiec technologiczny [1,2].

Ołów charakteryzuje się niską twardością oraz wysoką plastycznością. Jego temperatura topnienia wynosi zaledwie 327.3°C, co powoduje, że procesy obróbki mechanicznej, takie jak walcowanie czy wyciskanie, są stosunkowo proste i energooszczędne. Metal ten wykazuje ponadto wysoką odporność chemiczną, w szczególności w kontakcie z kwasem siarkowym (VI) przy ograniczonym dopływie tlenu, co warunkuje jego wykorzystanie do budowy aparatury chemicznej [1,3]. Istotną cechą ołowiu jest również wysoka zdolność do absorpcji promieniowania gamma oraz rentgenowskiego, przez co znajduje on powszechne zastosowanie w osłonach radiologicznych w medycynie oraz energetyce jądrowej [2].

### 2. Geneza złóż typu MVT oraz uwarunkowania geologiczno-gospodarcze w Polsce

W skorupie ziemskiej ołów występuje rzadko w stanie rodzimym. Najważniejsze znaczenie przemysłowe mają jego minerały, wśród których dominującą rolę odgrywa galena (PbS) (**Rysunek 1**).

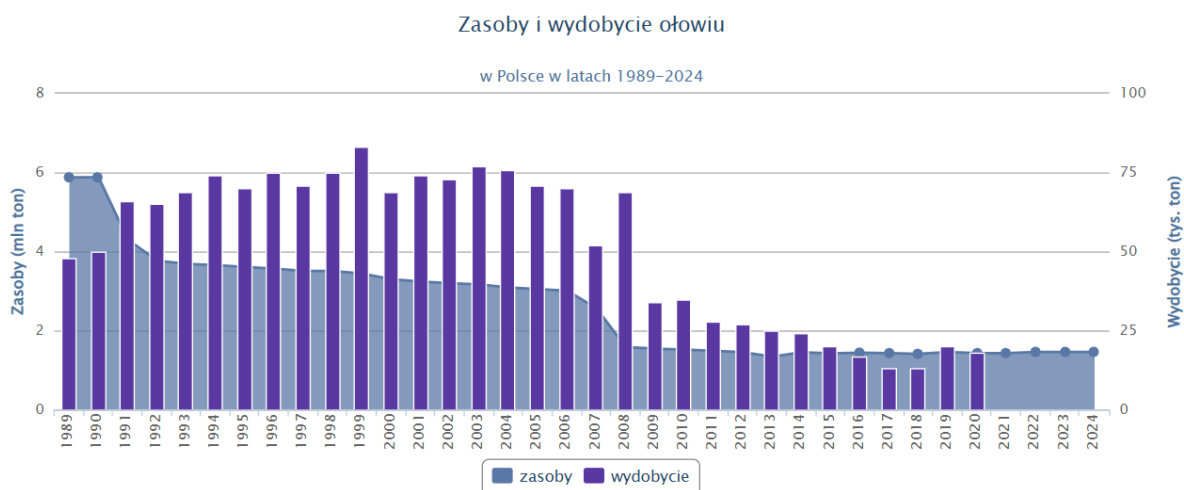
Do rzadziej spotykanych minerałów należą cerusyt ( $PbCO_3$ ), anglezyt ( $PbSO_4$ ) oraz krokoit ( $PbCrO_4$ ) [1].

Największe udokumentowane złoża ołowiu w Polsce zlokalizowane są w rejonie śląsko-krakowskim. Są to złoża typu Mississippi Valley (Mississippi Valley-Type, MVT), których geneza związana jest z procesami osadowymi i hydrotermalnymi, a nie zjawiskami wulkanicznymi. Gorące, zmineralizowane solanki hydrotermalne były wyciskane z głębi basenów osadowych w kierunku ich obrzeży. W temperaturach z zakresu od 70°C do 200°C nastąpiło wytrącenie siarczków metali w skałach węglanowych, prowadząc do powstania rozległych, stratoidalnych pokładów rud. Ta specyficzna budowa geologiczna przez lata determinowała rozwój górnictwa w rejonach Olkusza, Bytomia oraz Chrzanowa [1,3].



**Rysunek 1.** Ruda cynkowo-ołowiowa (galena  $PbS$ , sfaleryt  $ZnS$ ) [1].

Przez wiele dekad krajowe górnictwo cynku i ołowiu stanowiło jeden z filarów przemysłu wydobywczego. Dane statystyczne z lat 1989–2024 (**Rysunek 2**) wskazują jednak na wyraźną tendencję spadkową w ilości wydobycia. Kluczowym momentem było zakończenie eksploatacji w kopalni „Olkusz-Pomorzany” w 2020 roku, wynikające z wyczerpania zasobów możliwych do ekonomicznie uzasadnionego wydobycia [4].



**Rysunek 1.** Wykres przedstawiający zasoby i wydobycie ołowiu w Polsce w latach 1989-2024 [5].

Pomimo udokumentowania kolejnych zasobów (m.in. w okolicach Zawiercia i Kluczy), nie podejmuje się budowy nowych zakładów wydobywczych. Ograniczenie to wynika głównie z barier środowiskowych i społecznych. Eksploatacja rud  $Zn-Pb$  w tym rejonie wiąże się ze skomplikowanymi uwarunkowaniami hydrogeologicznymi; odwodnienie górotworu mogłoby doprowadzić do drenażu

lokalnych poziomów wodonośnych, wyschnięcia ujęć wody pitnej oraz powstawania zapadlisk. W połączeniu z rosnącymi kosztami energii elektrycznej oraz sprzeciwem społecznym, uwarunkowania te wymusiły zmianę modelu branży. Obecnie polska gospodarka ołowiem opiera się przede wszystkim na wtórnym odzysku surowca [3,4].

### 3. Metalurgia ołowiu – Imperial Smelting Process (ISP)

Główną technologią pozyskiwania ołowiu i cynku stosowaną w Polsce jest proces ISP (Imperial Smelting Process), realizowany w piecach szybowych [3,6].

Proces technologiczny rozpoczyna się od przygotowania wsadu, w skład którego wchodzi surowce tlenkowe oraz koncentraty poddawane operacjom spiekania lub brykietowania na gorąco. Kluczowym etapem syntezy jest redukcja w piecu szybowym przy użyciu koksu. W temperaturze przekraczającej 1000°C następuje redukcja tlenków metali. Ciekły ołów, ze względu na swoją dużą gęstość, spływa w dół pieca, skąd jest okresowo spuszcany jako tzw. ołów surowy [3,6].

Istotnym elementem technologii ISP jest selektywne rozdzielanie cynku i ołowiu. W warunkach wysokiej temperatury panującej w piecu, cynk przechodzi w fazę gazową i jest odprowadzany do skraplacza natryskowego (lead splash condenser). W urządzeniu tym wirniki mechaniczne rozpylają strumień ciekłego ołowiu, który absorbuje pary cynku. Powstały w ten sposób stop ciekły poddawany jest kontrolowanemu chłodzeniu. Ponieważ rozpuszczalność cynku w ołowiu maleje wraz ze spadkiem temperatury, lżejszy cynk wydziela się i wypływa na powierzchnię kąpielii metalicznej. Pozwala to na separację obu metali metodą dekantacji i uzyskanie produktów o wysokim stopniu czystości [6].

### 4. Współczesne i historyczne zastosowania ołowiu

Współczesna struktura konsumpcji ołowiu jest silnie zdominowana przez przemysł chemicznych źródeł prądu – produkcja akumulatorów kwasowo-ołowiowych generuje około 80% światowego zapotrzebowania na ten metal. Ołów wykazuje w tym zastosowaniu optymalne właściwości elektrochemiczne, zapewniając wysoką gęstość energii, dobrą odwracalność reakcji elektrodowych oraz stabilność korozyjną w środowisku stężonego kwasu siarkowego (VI). Pozostałe 20% globalnej produkcji znajduje zastosowanie w wytwarzaniu amunicji, stopów łożyskowych i lutowniczych oraz wyrobów walcowanych [1,2,3].

W ujęciu historycznym ołów był powszechnie stosowany jako składnik pigmentów malarskich, gdzie pełnił funkcję inhibitora korozji oraz przyspieszacza wysychania powłok. Ponadto, w postaci tetraetylku ołowiu  $Pb(C_2H_5)_4$ , stanowił powszechny dodatek antystukowy do benzyn silnikowych. Obecnie, ze względu na udowodnioną trwałość w środowisku i wysoką toksyczność, zastosowania te zostały całkowicie wycofane na mocy regulacji prawnych [1,2,3].

### 5. Toksykologia ołowiu – objawy, diagnostyka i leczenie ołowicy

Mimo korzystnych właściwości użytkowych, ołów jest pierwiastkiem silnie toksycznym. Narażenie ludzi na jego działanie – drogą pokarmową (skażona woda, żywność), inhalacyjną (pyły przemysłowe) lub przez kontakt z amunicją – prowadzi do rozwoju przewlekłego zatrucia nazywanego ołowicą [7,8].

Objawy kliniczne ołowicy wykazują niską specyficzność, co utrudnia wczesne rozpoznanie lekarskie. Do głównych manifestacji narządowych należą [7,8]:

- Układ pokarmowy: ostre, napadowe bóle brzucha (tzw. kolka ołowiana), nudności, wymioty oraz uporczywe zaparcia [7,8].

- Układ nerwowy: zaburzenia kognitywne, osłabienie pamięci, nadpobudliwość, stany depresyjne, a w zaawansowanym stadium neuropatii obwodowej prowadzące do niedowładów mięśni prostowników (efekt tzw. „bocianiego chodu” lub „opadającej dłoni”) [7,8].
- Układ krążenia: nadciśnienie tętnicze spowodowane uszkodzeniem śródbłonnki naczyń krwionośnych oraz dysfunkcją nerek [7].
- Jama ustna: występowanie tzw. rąbka Burтона – ciemnoszarej lub niebieskawej linii wzdłuż krawędzi dziąseł, będącej efektem reakcji jonów ołowiu z siarkowodorem wytwarzanym przez bakterie beztlenowe i odkładania się nierozpuszczalnego siarczku ołowiu (PbS) [8].
- Układ krwiotwórczy: niedokrwistość (anemia) mikrocytarna, wywołana inhibicją enzymów (głównie dehydratazy kwasu  $\delta$ -aminolewulinowego oraz ferrochelatazy) uczestniczących w biosyntezie hemu [7,8].

Szczególnie wysokie ryzyko toksykologiczne ołów stwarza wśród dzieci. Nawet niskie stężenia tego metalu w organizmie mogą wywołać nieodwracalne zmiany w ośrodkowym układzie nerwowym, skutkując opóźnieniem rozwoju psychomotorycznego, obniżeniem ilorazu inteligencji, syndromem ADHD oraz zachowaniami agresywnymi [7].

Współczesna diagnostyka laboratoryjna opiera się na oznaczaniu stężenia ołowiu we krwi pełnej (BLL – Blood Lead Level). Pomocniczo ocenia się morfologię krwi oraz wykonuje badania radiologiczne (RTG) kości długich, gdzie u dzieci widoczne bywają pasma wzmożonego wysycenia, tzw. „linie ołowiane”, świadczące o akumulacji metalu w tkance kostnej [7].

Procedura terapeutyczna wymaga bezwzględnego przerwania ekspozycji pacjenta na źródło ołowiu. W przypadkach klinicznie uzasadnionych (wysokie wartości BLL) wdraża się leczenie chelatujące. Środki chelatujące, takie jak sól wapniowo-disodowa kwasu etylenodiaminatetraoctowego, kwas dimerkaptobursztynowy czy penicyloamina, wiążą jony  $Pb^{2+}$  w rozpuszczalne w wodzie, stabilne kompleksy, które są następnie eliminowane z organizmu wraz z moczem. Usunięcie ołowiu z krwiobiegu nie gwarantuje jednak cofnięcia zaawansowanych zmian neurologicznych lub nefrologicznych, które często mają charakter permanentny [7, 8].

## 6. Recykling akumulatorów w kontekście gospodarki obiegu zamkniętego

Wobec wygaszenia krajowego wydobycia, podstawą funkcjonowania przemysłu ołowianego w Polsce stała się gospodarka obiegu zamkniętego. Zużyte baterie i akumulatory ołowiowe (klasyfikowane w katalogu odpadów pod kodem 16 06 01\*) stanowią odpady niebezpieczne, jednak technologia ich przetwarzania charakteryzuje się jedną z najwyższych efektywności w metalurgii wtórnej – stopień odzysku ołowiu wynosi obecnie 80–85% [9, 10].

Proces recyklingu rozpoczyna się od mechanicznego rozdrobnienia złomu akumulatorowego w kruszarkach, po czym następuje hydrodynamiczny rozdział grawitacyjny poszczególnych frakcji materiałowych [9]:

- Elektrolit (roztwór kwasu siarkowego (VI)): zostaje zneutralizowany za pomocą związków wapnia, w wyniku czego powstaje syntetyczny gips wykorzystywany w przemyśle budowlanym [9].
- Frakcja polimerowa: po uprzednim umyciu i granulacji jest kierowana do powtórnego przetwórstwa tworzyw sztucznych [9].
- Frakcja metaliczna oraz pasta ołowionośna: stanowią surowiec kierowany do pieców rafinacyjnych (obrotowych lub wahadłowych) [9].

Zastosowanie zaawansowanych systemów odpylenia oraz neutralizacji gazów procesowych minimalizuje emisję przemysłową ołowiu do atmosfery. Produktem końcowym procesów pirometalurgicznych jest ołów rafinowany o czystości dochodzącej do 99.99% wag. lub stopy ołowiu o ściśle zdefiniowanym składzie chemicznym, które są ponownie zawracane do cyklu produkcyjnego nowych akumulatorów [9,10].

## 7. Podsumowanie

Współczesny przemysł ołowiowy ma dwa zupełnie różne oblicza. Z jednej strony ołów stanowi substancję o udowodnionej, wysokiej toksyczności dla biosfery, z drugiej zaś pozostaje kluczowym elementem systemów magazynowania energii, determinującym stabilność sektora motoryzacyjnego i energetycznego. Ewolucja polskiego sektora metalurgicznego dowodzi, że integracja celów gospodarczych z bezpieczeństwem ekologicznym jest wykonalna. Substytucja inwazyjnego górnictwa pierwotnego wysokoefektywnym recyklingiem pozwala na aplikację unikalnych właściwości technicznych ołowiu przy jednoczesnej minimalizacji ryzyka środowiskowego i zdrowotnego.

## Literatura

- [1] Państwowy Instytut Geologiczny - PIB, Muzeum Geologiczne - Kopalnia Wiedzy, Cynk i ołów, 2026 [Dostęp: 17.05.2026].
- [2] M. Boldyrev, WikiJournal Sci. 1 (2018) 7.
- [3] J. Cabała, J. Janeczek, A. Kowalczyk, Narracje o Zagładzie (2021).
- [4] S.Z. Mikulski, W. Retman, W: K. Szamałek, M. Szuflicki, W. Mizerski (red.), Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31.12.2018 r., PIG-PIB, Warszawa, 2020, s. 152–161.
- [5] Państwowy Instytut Geologiczny - PIB, Bilans Zasobów Kopalin, Rudy cynku i ołowiu, 2026 [Dostęp: 18.05.2026].
- [6] J. López-Rodríguez et al., Metals 16 (2026) 104.
- [7] L. Halmo, T.M. Nappe, StatPearls (2023).
- [8] R. Ramesh, Subashvijayakumar, M. Sasikała, Int. J. Pharmacol. Toxicol. 2 (2013) 70–82 [Dostęp: 19.05.2026].
- [9] Baterpol S.A., Recykling akumulatorów ołowiowych, Strona główna przedsiębiorstwa, 2026 [Dostęp: 20.05.2026].
- [10] Orcal Agro, Neutralizacja metali ciężkich z gleby, Blog i technologia, 2026 [Dostęp: 20.05.2026].