

CHARAKTERYSTYKA ZANIECZYSZCZEŃ PYŁOWO-GAZOWYCH EMITOWANYCH PODCZAS WYTAPIANIA STALI W ŁUKOWYCH PIECACH ELEKTRYCZNYCH

Proces wytapiania stali w łukowym piecu elektrycznym jest źródłem zanieczyszczeń gazowych, pyłowych, żużlowych oraz ścieków przemysłowych. W prezentowanym artykule scharakteryzowano pyłowe i gazowe odpady hutnicze biorąc pod uwagę źródła ich powstawania i różnice w składzie chemicznym.

Słowa kluczowe: łukowy piec elektryczny, zanieczyszczenia gazowo-pyłowe, ochrona środowiska

CHARACTERISTIC OF GASEOUS AND DUST POLLUTIONS EMITTED DURING STEELMAKING IN ELECTRIC ARC FURNACE

Melting of steel in electric arc furnace is a source of plenty quantity of pollutions such as: gases, dusts, slag and industrial sewages. In the present work, the gaseous and dust metallurgical wastes were characterized taking into account the sources of their formation and differences in chemical composition.

Key words: electric arc furnace, gaseous and dust pollutions, environmental protection

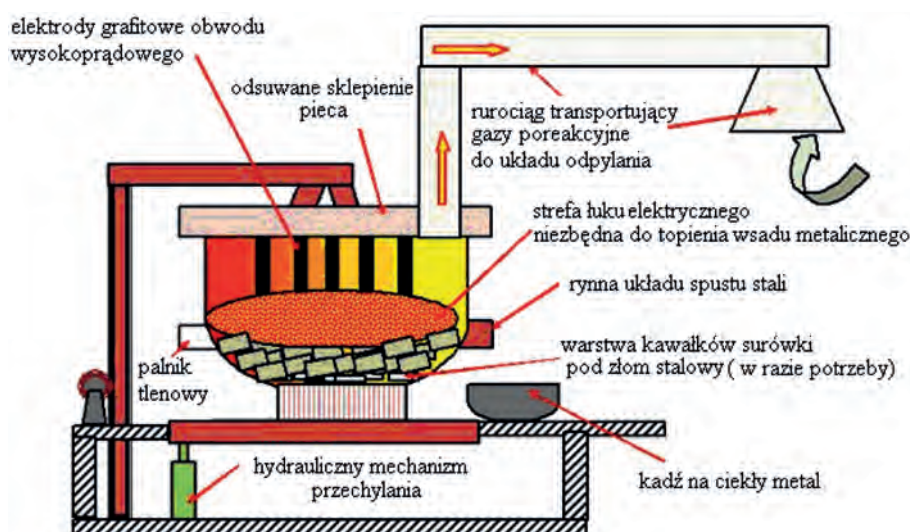
1. WPROWADZENIE

Prawie wszystkim procesom technologicznym w hutach, w tym również w stalowniach elektrycznych towarzyszy emisja zanieczyszczeń gazowych i pyłów. Pyły i gazy emitowane do atmosfery są bardzo szkodliwe dla człowieka, jak i jego otoczenia. Szczególnie narażone na zanieczyszczenia są rośliny. Osiadając na liściach roślin pyły są powodem zaburzeń w prawidłowym funkcjonowaniu ich aparatu oddechowego i asymilacyjnego. Prowadzi to do zmniejszenia żywotności roślin, a w skrajnych przypadkach do ich obumarcia [1].

2. WYTAPIANIE STALI W STALOWNI ELEKTRYCZNEJ

Łukowy piec elektryczny (ŁPE) (rys. 1) to urządzenie, w którym zamiana energii elektrycznej w ciepłą odbywa się w łuku elektrycznym (w niewielkiej objętości łuku można skoncentrować ogromną moc i osiągnąć bardzo wysokie temperatury) [2]. Zastosowanie energii elektrycznej do wytapiania stali pozwala na uzyskiwanie:

- wysokiej temperatury w przestrzeni roboczej pieca wraz z możliwością jej regulacji,



Rys. 1. Schemat łukowego pieca elektrycznego [3]

Fig. 1. Diagram of the electric arc furnace [3]

- wysokiej sprawności cieplnej,
- stali o odpowiedniej jakości i akceptowalnej zawartości wtrąceń niemetalicznych.

Na rys. 1 przedstawiono schemat pieca łukowego.

ŁPE składa się z kotła przykrytego sklepieniem, w którym znajdują się otwory służące do wprowadzania elektrod grafitowych do przestrzeni roboczej pieca, a czwarty otwór z zabudowanym na nim tzw. kolanem stanowi odprowadzenie gazów poreakcyjnych do układu odpylania. Sklepienie wspiera się na stalowym pierścieniu chłodzonym wodą. Kocioł pieca składa się z wanny (część pieca, gdzie zbiera się ciekły metal i żużel) i cylindra, w nim umieszczone jest okno robocze (służy do kontroli stanu wnętrza pieca, naprawy uszkodzonych części wyłożenia ogniotrwałego, pobierania prób metalu i żużla) zamykane zasuwami chłodzonymi wodą oraz otwór spustowy umieszczony w trzonie pieca (obecnie wykonany najczęściej wg konstrukcji EBT (Eccentric Bottom Tapping). Piec ma również mechanizm służący do jego przechylenia, urządzenie do podnoszenia i opuszczania oraz automatycznej regulacji położenia elektrod podczas pracy pieca oraz elektryczny układ zasilania i regulacji parametrów prądowo-napięciowych. Technologię wytwarzania stali w ŁPE można podzielić na następujące etapy:

1. naprawę pospustową pieca,
2. ładowanie wsadu,
3. roztapianie wsadu (rozpoczyna się po nasunięciu sklepienia na kocioł, opuszczeniu elektrod i włączeniu prądu elektrycznego),
4. świeżenie,
5. rafinację,
6. odtlenianie (w większości przypadków etap ten realizowany jest w kadzi podczas spustu stali),
7. spust stali do kadzi.

3. ZANIECZYSZCZENIA ATMOSFERY PODCZAS WYTAPIANIA STALI W ŁPE

Głównymi zanieczyszczeniami przedostającymi się do atmosfery podczas procesu wytapiania stali w elektrycznym piecu łukowym są gazy poreakcyjne (GPr) zanieczyszczone pyłem, określane zanieczyszczeniami gazowo-pyłowymi. Ilość pyłów zawartych w GPr zależy głównie od następujących czynników:

- rodzaju stosowanych materiałów wsadowych, w tym żużłotwórczych, nawęglających,
- ilości zanieczyszczeń zawartych w złomie stalowym (powłoki lakiernicze, emalierskie, cynkowe, cynowe, z tworzyw sztucznych i in.)
- ilości gazowego tlenu stosowanego do intensyfikacji roztapiania i świeżenia,

- stosowania dodatkowych palników gazowych lub olejowych (przyspieszenie roztapiania wsadu).

Wytwarzanie stali w łukowych piecach elektrycznych oraz procesy obróbki pozapiecowej mogą być źródłem znaczącej emisji tlenków metali (żelaza, cynku, ołowiu i kadmu), CO i CO₂, dioksyn i furanów (PCDD – polichlorowana dibenzo-p-dioksyna, PCDF – polichlorowana dibenzo-p-furan, PCB – polichlorowane bifenyle), węglowodorów aromatycznych oraz HF, HCl [4]. W tabelicy 1 zestawiono ogólną charakterystykę głównych zanieczyszczeń gazowo-pyłowych emitowanych w poszczególnych okresach wytapiania stali w elektrycznych piecach łukowych.

Tabela 1. Zanieczyszczenia gazowo-pyłowe emitowane z łukowych pieców elektrycznych [5]

Table 1. Gaseous and dust pollutions emitted from electric arc furnaces [5]

Okres wytopu	Zanieczyszczenia
Naprawa pospustowa	⇒ pyły (narzucanie dolomitu na trzon pieca), ⇒ dymy (spaliny) → produkt spalania smoły (naprawa pieca przy użyciu masy ze smoły)
Ładowanie pieca	⇒ pyły pochodzenia mechanicznego
Topienie	⇒ pyły z ziarnami materiałów żużłotwórczych (wapno, dolomit),
Świeżenie	⇒ CO (utlenianie węgla w kąpeli metalowej) ⇒ spaliny o dużym zapyleniu (ilość pyłu unoszona z pieca może dochodzić do 10 kg/Mg stali) ⇒ przyrost ilości gazów i ich „wybijanie” przez nieszczelności pieca
Rafinacja	⇒ spaliny o mniejszym zapyleniu, ⇒ pyły (ilość uchodzącego pyłu ok. 1÷2 kg/Mg stali) ⇒ brunatne dymy (efekt częściowego utleniania żelaza)
Spust	⇒ spaliny o dużym zapyleniu (duże ilości nad rynną spustową oraz kadzią) → emisja nieorganizowana

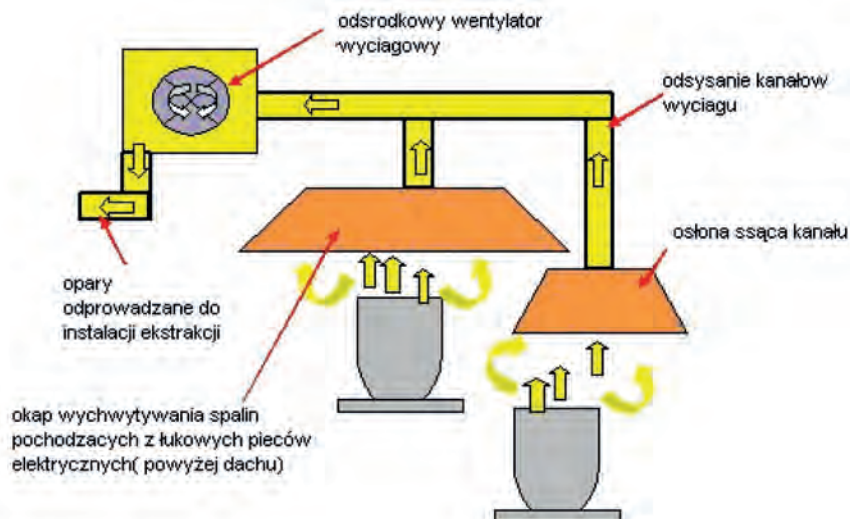
Ilość emitowanych pyłów z pieców elektrycznych waha się od 1 do 17 kg/Mg stali, a w ich skład wchodzi m.in. tlenki żelaza (50÷60%), tlenki manganu (5÷10%), tlenek wapnia → 4÷20% [5]. Typowe wymiary cząstek pyłu gruboziarnistego wynoszą: 10÷18 μm (80%), 10÷44 μm (7÷71%), < 44 μm (7÷16%). Skład chemiczny GPr odprowadzanych z elektrycznych pieców łukowych w dużej mierze zależy od sposobu odprowadzania gazu i fazy wytopu, a także od pojemności pieca (tabela 2).

Na rysunku 2 przedstawiono stosowane instalacje do odprowadzania spalin pochodzących z łukowych pieców elektrycznych.

Tabela 2. Skład chemiczny GPr z łukowych pieców elektrycznych o pojemności od 1,5 do 45 Mg odprowadzanych z przestrzeni roboczej pieca [6]

Table 2. Chemical composition of gasses from electric arc furnaces of 1,5 to 45 Mg capacity [6]

Składnik spalin	Zawartość składnika gazowego w poszczególnych fazach procesu, %				
	Początkowy okres roztapiania	Końcowy okres roztapiania	Świeżenie rudą	Świeżenie tlenem	Rafinacja
CO ₂	0,4÷1,6	0,2÷0,7	0,3÷1,6	1,1÷4,6	0,2÷0,9
SO ₂	< 0,002	< 0,0025	< 0,003	< 0,002	< 0,002
O ₂	19,6÷20,8	20,3÷20,7	19,4÷20,8	19,2÷20,5	20,1÷20,6
N ₂ + reszta	reszta do 100%	reszta do 100%	reszta do 100%	reszta do 100%	reszta do 100%



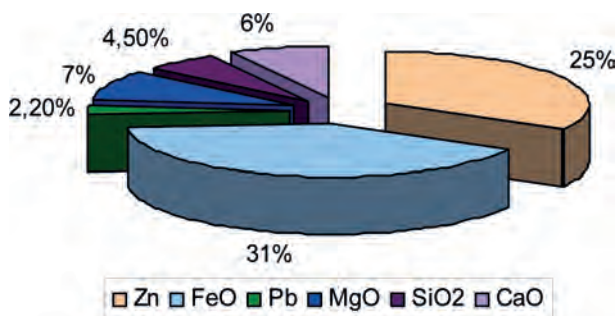
Rys. 2. Układ odprowadzania GPr pochodzących z łukowych pieców elektrycznych [7]

Fig. 2. Fume extraction layout over EAF process area [7]

Ilość pyłu zawartego w GPr w poszczególnych okresach wytopu zmienia się w szerokich granicach. Przykładowo dla krajowych pieców wynosi:

- początkowy okres wytopu $0,08 \div 3,1 \text{ g/m}^3$,
- końcowy okres wytopu $0,04 \div 5,3 \text{ g/m}^3$,
- okres świeżenia rudą $0,07 \div 5,5 \text{ g/m}^3$,
- okres świeżenia tlenem $0,85 \div 7 \text{ g/m}^3$,
- wykańczanie $0,06 \div 3,7 \text{ g/m}^3$

Emitowane pyły określone są w światowej literaturze skrótem EAFD, z angielskiego Electric Arc Furnace Dust. Pył tworzący się w czasie wytapiania stali w elektrycznych piecach łukowych jest drobnoziarnisty. Pył unoszony w GPr i zbierany w urządzeniach odpylających może być recykulowany, celem odzysku żelaza, zwiększania stężenia cynku (do zawartości $25 \div 30\%$), umożliwiającego jego wykorzystanie jako nośnika tego metalu w hutach cynku. Część pyłów z procesu elektrycznego jest poddawana recyklingowi, reszta trafia do cementowni jako wsad do procesu wypalania klinieru lub jest składowany. Odpady z polskich elektrostalowni (w tym pyły) są aktualnie praktycznie w 100% wykorzystywane gospodarczo. Duża zawartość pyłów w gazach zmusza do ich oczyszczania. Zanieczyszczenia pyłowe są obecnie zatrzymywane w nowoczesnych urządzeniach odpylających. Obserwuje się również znaczną redukcję emisji gazów, spowodowaną modernizacją procesów produkcyjnych. Na rysunku 3 przedstawiono skład chemiczny pyłów stalowniczych [8].



Rys. 3. Skład chemiczny pyłu stalowniczego w % masowych [8]

Fig. 3. Chemical composition of EAF dust [8]

4. MECHANIZM POWSTAWANIA PYŁÓW STALOWNICZYCH

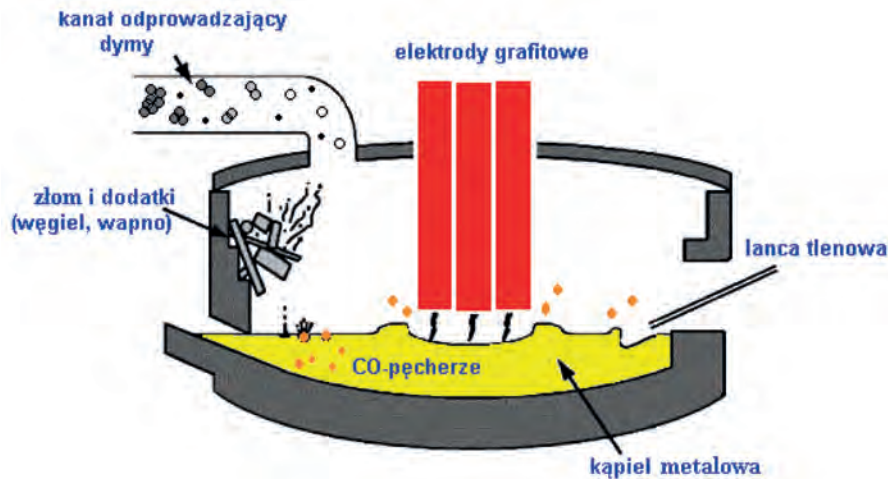
Pyły stalownicze powstają w wyniku częściowego ulatniania się oraz później następującej kondensacji par niektórych składników wsadu. Są to pyły kondensacyjne składające się z cząstek bardzo małych o wielkościach ok. kilku dziesiątych μm [9].

Największa ilość pyłu emitowana jest przez wszelkiego rodzaju nieszczelności pieca i otwory, takie jak: pierścienie wokół elektrod, otwór spustowy, nieszczelności ułożenia sklepienia i zamknięcia okna wsadowego [2]. Formowanie pyłów podczas wytapiania stali w łukowym piecu elektrycznym determinowane jest poszczególnymi etapami procesu, wśród których wyróżniamy:

- załadunek pieca: złom kawałkowy wraz z dodatkami (wapno palone, węgiel) ładowany do pieca za pomocą koszyków załadunkowych [10]. Zapylenie gazu jest małe i zależy od czystości wsadu [6];
- okres topienia: tworzący się łuk elektryczny pomiędzy grafitowymi elektrodami, roztopia załadowany wsad. Utworzona kąpiel pokrywa się warstwą żużla, z której zaczynają się ulatniać rozpuszczone w niej substancje, np. cynk [10];
- okres rafinacji: wskutek wypalania się węgla w kąpeli powstaje tlenek węgla. Dodatek tlenu podczas reakcji wypalania węgla w kąpeli intensyfikuje emisję gazów z pieca przez jego nieszczelności [10];
- okres formowania żużla: pęcherze CO przechodząc przez warstwę żużla tworzą na jego powierzchni pianę, której formowanie intensyfikowane jest poprzez dodatek sproszkowanego węgla [10];
- okres spustu: następuje duża emisja gazów nad kadią, a duże zapylenie spowodowane jest wprowadzaniem do kąpeli żelazostopów i materiałów żużłotwórczych, m.in. żelazokrzemu [6].

Schemat formowania się pyłów podczas wytapiania stali w łukowym piecu elektrycznym przedstawia rysunek 4.

Analiza morfologiczna pyłów pochodzących z łukowych pieców elektrycznych, wykazała, iż proces formowania się pyłów składa się z dwóch zasadniczych etapów:



Rys. 4 Schemat formowania się pyłów podczas wytapiania stali w łukowym piecu elektrycznym [10]

Fig. 4. Forming dusts during steelmaking in electric arc furnace [10]

a. emisji pyłów tzw. „prekursorów” czyli par, kropeł metali, zawieszonych cząstek stałych w przestrzeni roboczej pieca;

b. przemiany tzw. „prekursorów” w pył przez aglomerację oraz fizykochemiczne przemiany.

Szczegółowy mechanizm emisji pyłów składa się z pięciu etapów:

- parowanie: zlokalizowane szczególnie w gorących strefach pieca (1) oraz w strefie lancy tlenowej (1'), u wylotu której tworzą się pęcherze CO;
- wyrzuty kropli metalu podczas zderzeń cząstek metali ze sobą i ze ścianami pieca (2) oraz podczas wdmuchiwanego tlenu do kąpieli (2');
- wyrzuty czystych kropli wraz z wydobywającymi się pęcherzami CO, pochodzącymi z odwęglania kąpieli (3);
- wydobywające się krople w kontakcie z utleniającą atmosferą panującą wewnątrz pieca, sklasyfikowano jako mechanizm wytracania się pęcherzy CO (4);
- bezpośrednie wyrzuty cząstek stałych podczas wprowadzania do pieca sproszkowanych materiałów jak: węgiel, dodatki żużlotwórcze, recykulowany pył oraz drobny żelazo (5).

Schemat szczegółowego mechanizmu tworzenia się pyłów podczas wytapiania stali w łukowym piecu elektrycznym przedstawiono na rysunku 5.

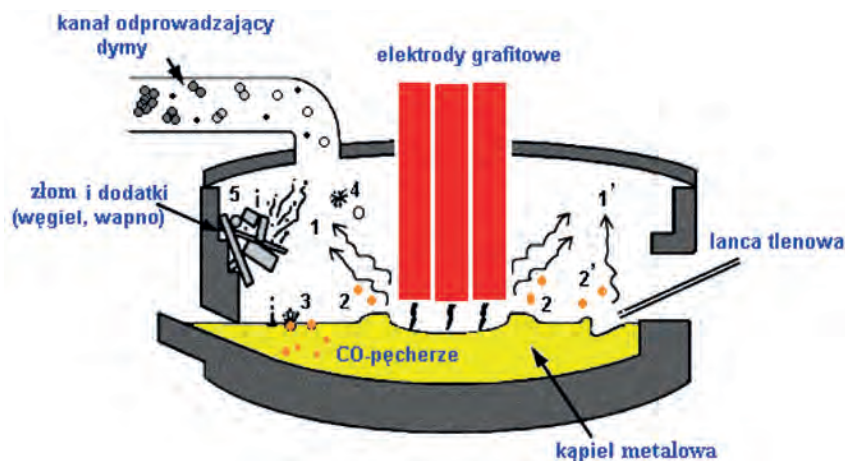
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W podsumowaniu można stwierdzić, że hutnictwo żelaza i stali jest jednym z głównych „producentów” zanieczyszczeń pyłowych i gazowych emitowanych do atmosfery. Emisja ta jest wynikiem realizacji wielu procesów, zużywających duże ilości surowców i nośników energetycznych, o różnorodnej postaci fizycznej, w tym o bardzo drobnym uziarnieniu. Surowce poprzez kilkukrotne przerabianie i ich transport do różnych agregatów stają się źródłem różnorodnych zanieczyszczeń stałych, w postaci pyłu zawieszonego.

Każda huta poprzez wybór odpowiedniego procesu technologicznego może wpływać na ochronę środowiska naturalnego. Obecnie wiele zakładów chroniąc środowisko naturalne stosuje procesy technologiczne, w których:

- następuje wychwycenie dużej ilości zanieczyszczeń dzięki zastosowaniu wysokosprawnych urządzeń odpylających,
- ma miejsce racjonalna utylizacja odpadów, ich wewnątrzzakładowe zagospodarowanie lub sprzedaż do innych zakładów.

Zastosowanie nowoczesnych technologii oczyszczania gazów oraz recyklingu składowanych odpadów w po-



Rys. 5. Szczegółowy mechanizm kształtowania się pyłów podczas wytapiania stali w łukowym piecu elektrycznym [10]

Fig. 5. Detailed mechanism of dust formation during steelmaking in electric arc furnace [10]

staci pyłów pozwoli na ograniczanie emisji toksycznych składników do środowiska naturalnego, przyczyniając się tym samym do zmniejszenia eksploatacji złóż naturalnych. Odzyskiwanie z gazów odlotowych zwią-

ków chemicznych metali, np. cynku, ołowiu i kadmu pozwala na znaczne ograniczenie dodatków surowców kopalnych, co przyczynia się do zmniejszenia kosztów produkcji tych metali.

LITERATURA

1. Ostrowska P., J. Siwka: Negatywny wpływ metali emitowanych w procesach stalowniczych na organizmy żywe, XV Międzynarodowa Konferencja Naukowo Techniczna: Produkcja i Zarządzanie w Hutnictwie, Zakopane w dniach 27-30 czerwca 2007, s. 181-184;
2. Sochowicz S.: Wytapianie stali w piecach elektrycznych, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1988
3. <http://wdict.net/pl/gallery/piec+%C5%82ukowy/n/1/>; 30.01.2012;
4. Wei-Sheng Chen, Yun-Hwei Shen, Min-Shing Tsai, Fang-Chih Chang: Removal of chloride from electric arc furnace dust, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 190, Issue. 1-3, 20011, ss. 639-644
5. Jarzębski S., Kapała J.: Atlas zanieczyszczeń wydzielanych przy procesach hutnictwa żelaza, Wydawnictwo Śląsk, 1975
6. Ryszka E.: Ochrona powietrza przed zanieczyszczeniami w hutnictwie żelaza, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1976
7. Scott W., Understanding Electric arc furnaces, *Manufacturing Technology*, 27/7/2010, ss. 1-6
8. Mróz J., Recykling i utylizacja materiałów odpadowych w agregatach metalurgicznych, Wydawnictwo P.Cz, Częstochowa 2006
9. Byrtus F., Michałowski M., Mazanek C., Mazanek E., Mazanek T., Polek Z., Witek Z., *Hutnictwo ogólne*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1977, ss. 373-379
10. Guézenneca A.G., Huberb J.Ch., Patissona F., Sessiecqa P., Birat J.P., Ablitzera D.: Dust formation in Electric Arc Furnace: Birth of the particles, *Powder Technology*, vol. 157, Issue: 1-3, 2005, ss. 2-11