

dr hab. inż. Henryk Radomiak, prof. Politechniki Częstochowskiej

dr hab. inż. Monika Zajemska, prof. Politechniki Częstochowskiej

dr hab. inż. Marcin Knapieński, prof. Politechniki Częstochowskiej

dr inż. Dorota Musiał

mgr inż. Kamila Śpiewak

mgr inż. Monika Jarnecka

mgr inż. Anna Chamara

inż. Przemysław Rajca

inż. Magdalena Kocyba

Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Politechnika Częstochowska

dr inż. Krystian Szczepański

Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie

Wybrane zagrożenia i sposoby ich minimalizacji w przemyśle hutniczym

Abstrakt

W artykule przedstawiono wybrane zagrożenia występujące w przemyśle hutniczym. Szczególną uwagę zwrócono na zagrożenia związane z obecnością substancji niebezpiecznych, w tym pyłów i gazów procesowych, gazów palnych, jak również niepożądanych produktów ich spalania: CO₂, CO czy NO_x. Niewłaściwe postępowanie z nimi może być przyczyną niekontrolowanego uwalniania się ww. gazów, a w konsekwencji pożaru lub wybuchu. Odpowiednio szybka identyfikacja zagrożenia może zminimalizować, a nawet wyeliminować ryzyko jego wystąpienia. Dlatego też w artykule, jako istotny element bezpieczeństwa każdego zakładu przemysłowego, wskazano odpowiedni system detekcji gazów. Opisany system może nie tylko zmniejszyć ryzyko związane z wystąpieniem poważnej awarii, ale przede wszystkim ograniczyć skutki bezpośredniego zagrożenia zatruciem lub utratą życia ludzi znajdujących się w pobliżu miejsca uwalniania się gazów.

Słowa kluczowe: zagrożenia pyłowe i gazowe, przemysł hutniczy

Selected Hazards and Ways of their Minimization in the Steel Industry

Abstract

The article presents the selected hazards that may exist in the steel industry. Particular attention was paid to the risks associated with the hazardous substances, including particular matters and process gases, combustible gases such as coal gas or natural gas, as well as the unwanted products of combustion: CO₂, CO and NO_x. Improper handling of them can cause uncontrolled release, and consequently can lead to fire or explosion. Accordingly fast hazard identification can minimize or even eliminate the risk of its occurrence. Therefore, in the article a suitable gas detection system, as an important element of the safety of each industrial plant was pointed out. The system described in the article can not only reduce the risk of suffering a major accident, but firstly to minimize the effects of direct danger of poisoning or loss of life of people in the vicinity of the gases release.

Keywords: dust and gas risks, metallurgical industry

Wstęp

Przemysł hutniczy żelaza i stali ma znaczenie strategiczne dla gospodarki, nie tylko krajowej, ale i światowej [1–4]. Jednocześnie sektor ten charakteryzuje się dużym zużyciem energii i znaczną emisją zanieczyszczeń pyłowo-gazowych [5, 6].

Wzrost świadomości ekologicznej w sektorze polskiego hutnictwa nastąpił stosunkowo późno, a jego przyczyną była wysoka uciążliwość dla środowiska. Doprowadziła ona do zamykania nie tylko wydziałów, ale i całych przedsiębiorstw, a także nakładania wysokich kar za emitowane zanieczyszczenia przez zakłady funkcjonujące. Efekty działań proekologicznych na szerszą skalę były widoczne dopiero w ostatniej dekadzie XX wieku. Do 1992 roku, tj. do czasu restrukturyzacji polskiego hutnictwa, głównymi źródłami zanieczyszczeń, takich jak: CO, SO₂, NO_x i węglowodory, były wydziały surowcowe hut (stalownie, spiekalnie, wielkie piece, ewentualnie koksownie) [5].

Aby sprostać coraz bardziej rygorystycznym, prośrodowiskowym uregulowaniom prawnym, wprowadzanym w Unii Europejskiej (Europejski

System Handlu Emisjami oraz polityka klimatyczna UE), konieczna jest modernizacja procesów produkcyjnych i prowadzenie działań optymalizacyjnych pod kątem ograniczenia emisji zanieczyszczeń [7].

Na uwagę zasługują działania optymalizacyjne przeprowadzone w wielu hutach poza granicami naszego kraju, których efektem było m.in. obniżenie emisji zanieczyszczeń [1, 3, 4, 8–10] polegające na odpowiednim doborze parametrów procesu spalania, a w szczególności stosunku nadmiaru powietrza i temperatury podgrzewanego powietrza, zagospodarowaniu tzw. gazów po-produkcyjnych czy zastosowaniu palników niskoemisyjnych [11, 12].

Jak wynika z badań przeprowadzonych przez Lee i innych [9, 10], obniżenie współczynnika nadmiaru powietrza z 4% O₂ na 3% w spalinach wylotowych oraz podwyższenie temperatury podgrzewanego powietrza z 473 do 513 K przyczynia się do redukcji emisji CO₂ (o $3,1 \times 10^3$ t) i NO_x (o 14,3%).

1. Rodzaje zagrożeń w przemyśle hutniczym

Na terenie huty, na każdym etapie produkcji wyrobu stalowego, występuje szereg czynników niebezpiecznych, takich jak [13–17]:

- ponadnormatywne natężenie hałasu;
- wysoka temperatura;
- obecność substancji niebezpiecznych;
- obecność palnych gazów;
- emisja pyłów i gazów produkcyjnych, obecność których prowadzi do powstawania zagrożeń, a w szczególności:
 - uwalniania się palnych gazów, takich jak: gaz wielkopiecowy, gaz ziemny i gaz koksowniczy,
 - niekontrolowanego wycieku gazów technicznych,
 - niekontrolowanego wycieku oleju płuczkowego ze zbiorników oraz instalacji,
 - niekontrolowanego wycieku benzolu koksowniczego i smoły koksowniczej,
 - możliwości wystąpienia toksycznych oparów benzolu koksowniczego, powstałych podczas pożaru zbiorników z tą substancją.

Szczególnie istotnym rodzajem zagrożeń jest emisja gazów palnych, tworzących z powietrzem niebezpieczną mieszaninę, która może być przyczyną wybuchu lub pożaru [18]. W zależności od wzajemnych proporcji powietrza

i paliwa, pod wpływem iskry lub przekroczenia temperatury samozapłonu, dochodzi do zainicjowania reakcji spalania, któremu towarzyszy bardzo duża prędkość rozwoju płomienia. Podczas pożaru, na skutek termicznego rozkładu palących się substancji i materiałów, dodatkowym zagrożeniem dla życia i zdrowia ludzkiego są zagrożenia chemiczne, związane z uwalnianiem się szkodliwych gazów, np. tlenku węgla. Ich ilość zależy od wielu czynników, a w szczególności od rodzaju paliwa, zawartości tlenu w powietrzu oraz temperatury, w jakiej zachodzi proces spalania [19].

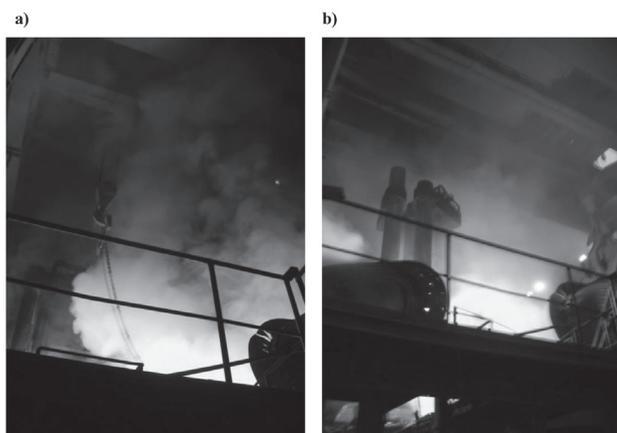
Dla przykładu, w hucie Arcelormittal Poland SA najpoważniejszym zagrożeniem jest emisja palnych gazów: wielkopiecowego, konwertorowego, ziemnego czy też koksowniczego [13]. Do uwolnienia gazu wielkopiecowego może dojść wskutek rozszczelnienia armatury technologicznej, jak również w skrajnym przypadku nieprzewidzianej awarii pieca, której towarzyszy emisja niedopalonego gazu. Konsekwencją jest zagrożenie pożarem i/lub wybuchem, jak również, w najbliższym sąsiedztwie, zatrucie tlenkiem węgla. Jeszcze większym zagrożeniem jest obecność na terenie huty gazu koksowniczego, produktu ubocznego otrzymywanego przy produkcji koksu. Surowy gaz koksowniczy, ze względu na obecność niepożądanych składników, takich jak smoła, amoniak, węglowodory benzolowe czy siarkowodór wymaga wielostopniowego oczyszczania. Z tony skoksowanego węgla uzyskuje się około 310–350 m³ oczyszczonego gazu o składzie: H₂ – 53–60%, CH₄ – 3–28%, C_mH_n – 2–4%, CO – 6–10%, CO₂ – 2–4%, N₂ – 3–8%, O₂ – 0,2–0,8% [19]. Gaz koksowniczy, ze względu na swoją toksyczność i łatwopalność oraz obecność praktycznie na całym obszarze zakładu, jest wyjątkowo niebezpieczny i objęty jest szczególnym nadzorem [13]. Jeszcze innym rodzajem zagrożeń występującym zarówno w hutnictwie żelaza, jak i metali nieżelaznych, takich jak: miedź, ołów czy cynk, jest narażenie na obecność arsenu i jego związków, zaliczanych do grupy czynników o udowodnionym epidemiologicznie działaniu rakotwórczym (grupa 1) [20].

2. Charakterystyka wybranych zagrożeń na wydziale stalowni

W celu przybliżenia wybranych zagrożeń występujących w przemyśle hutniczym, szczegółowej analizie poddano jeden z wydziałów huty żelaza i stali, a mianowicie wydział stalowni. W analizowanym wydziale huty głównym źródłem zanieczyszczeń jest piec elektryczno-gazowy KONEL, produkujący stal dla potrzeb huty.

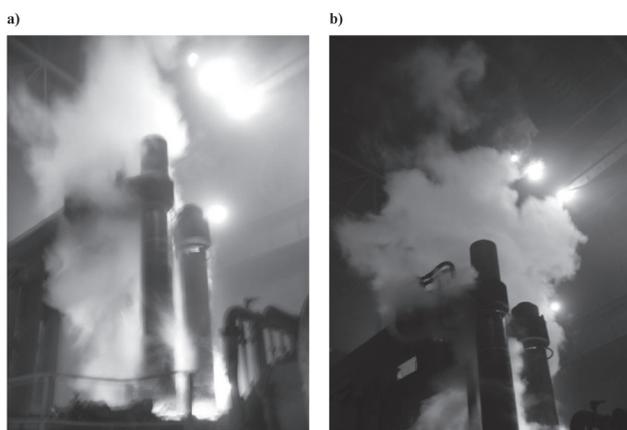
Powstające w procesie produkcyjnym gazy i pyły odlotowe z pieca odbierane są układem pierwotnym i wtórnym, a następnie kierowane do odpylni workowej. Za odpylnią workową zainstalowane są wentylatory wyciągowe, które kierują oczyszczone gazy odlotowe do komina. Układ wtórny stanowią trzy rury z prostokątnymi wlotami usytuowane pod stropem hali nad piecem. Rury łączą się we wspólny kolektor umieszczony na dachu hali. Do kolektora włączone są „odbiorcy gazów” z podajników żelazo-stopów.

Na rys. 1 i 2 przedstawiono widok rozprzestrzeniających się gazów i pyłów nad piecem podczas jego załadunku oraz podczas roztopiania wsadu.



Rys. 1. Widok uchodzących gazów i pyłów podczas załadunku pieca

Źródło: opracowanie własne



Rys. 2. Widok rozprzestrzeniających się gazów i pyłów nad piecem podczas roztopiania I i II kosza

Źródło: opracowanie własne

O ilości widocznych na rys. 1 i 2 wydzielanych gazów i pyłów podczas roztopiania wsadu decyduje, oprócz wsadu stałego, strumień podawanego gazu i tlenu. Intensywność wydzielania się gazów w piecu zależy również od fazy wytopu. Średni strumień wydzielanych gazów odbieranych układem pierwotnym wynosi 120 000 m³/h.

Strumień odbieranych z pieca gazów układem pierwotnym skutkuje dużą prędkością tych gazów w warunkach rzeczywistych, rzędu 25 m/s. To powoduje porywanie cząstek stałych wsadu i żużli z pieca. Porywane cząstki w wyniku zmiany kierunku oraz częściowego ochłodzenia przylegają w dolnej części do ściany kolana stałego w sklepieniu i kolana ruchomego, zmniejszając w ten sposób powierzchnię przekroju kanału wylotowego. Konsekwencją tego jest wzrost ciśnienia w piecu i wyrzucanie w niekontrolowany sposób gazów przez wszystkie nieszczelności pieca, szczególnie przez szczeliny pomiędzy sklepieniem, a elektrodami. Wówczas w przestrzeni nadpiecowej powstaje znaczny strumień zapylnych gazów, które unoszą się ku górze i są odbierane przez kolektory poziome układu wtórnego umiejscowione pod stropem hali. W przypadku zbyt intensywnego wydzielania się tych gazów kolektory nie przejmują całego strumienia i gazy rozchodzą się w przestrzeni podstropowej w kierunku nadjeżdżających suwnic. Pod stropem hali występuje znaczne zadymienie (rys. 3).



Rys. 3. Zadymienie podstropowej części hali

Źródło: opracowanie własne

Ilość gazów wyrzucanych do hali zależy od ciśnienia statycznego panującego w układzie pierwotnym i wtórnym. Duże podciśnienie przed odpylnią nie „przekłada” się na odpowiednie wartości w piecu, co świadczy o znacznym oporze hydraulicznym układu pierwotnego. Zmierzone ciśnienie statyczne w wybranych miejscach pieca świadczy o zbyt słabym oddziaływaniu układu pierwotnego. Ponadto, ciśnienie w piecu rozkłada się nierównomiernie. Przy ścianie naczynia występuje niskie podciśnienie, zaś przy elektrodach nadciśnienie, co świadczy o strumieniu wyrzucanych gazów na zewnątrz pieca. Wyrzucane gazy nad piecem przy znacznej objętości posiadają małą dynamikę wznosną, co świadczy o zbyt słabym oddziaływaniu kolektorów poziomych pod stropem. Ruch tych gazów przebiega nierównomiernie. Podczas załadunku pieca gazy odbijają się od kosza i konstrukcji suwnicy (rys. 1). Kolektory poziome nie przejmują odbitych gazów, które rozprzestrzeniają się po hali.

Dodatkowo przeprowadzono badania granulometryczne wyrzucanego z pieca pyłu, które wykazały, że największą część stanowi pył o granulacji $90 \div 450 \mu\text{m}$. Udział drobnej frakcji pyłu (powyżej $31 \mu\text{m}$) zawiera się w granicach $17 \div 25\%$, natomiast najgrubszej frakcji (powyżej $460 \mu\text{m}$) wynosi od $7,5 \div 11\%$.

3. Sposoby minimalizacji i wykrywania zagrożeń

Minimalizacja zagrożeń związanych z emisją toksycznych gazów i pyłów powstających w procesach produkcyjnych jest realizowana m.in. przez wychwytywanie zanieczyszczeń bezpośrednio u źródła oraz poprzez właściwy przepływ powietrza w pomieszczeniu pracy [21, 22]. Najprostszym, jednak nie zawsze możliwym do realizacji rozwiązaniem, jest całkowite lub chociaż częściowe obudowanie maszyny produkcyjnej emitującej zanieczyszczenia. Jeśli obudowanie nie jest możliwe, stosowane są odciągami miejscowe, połączone z instalacją odpylającą. Odciągami te wychwytyują zanieczyszczenia, jednak tylko bezpośrednio przy źródle, zapobiegając ich rozprzestrzenianiu się w pomieszczeniu. W zależności od miejsca źródła emisji, kierunku i prędkości rozprzestrzeniających się zanieczyszczeń pyłowych, dobiera się odpowiedni rodzaj odciągu miejscowego. Istotne jest również, aby w miejscach narażonych na emisję pyłów, oprócz miejscowej wentylacji mechanicznej, funkcjonowała ogólna wentylacja mechaniczna.

Ilość wychwyconych u źródła emisji pyłów oraz tych, które rozprzestrzeniły się po hali, zależy od skuteczności działania elementu wychytującego zanieczyszczenia oraz jego umiejscowienia w odniesieniu do źródła emisji zanieczyszczeń [21, 22]. Niewłaściwa praca urządzenia wentylacji miejscowej może być przyczyną wzrostu stężenia zanieczyszczeń w strefie oddychania pracowników na stanowiskach pracy.

Jak podaje literatura przedmiotu, w krajach UE do badania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń i oceny skuteczności funkcjonowania systemów wentylacyjnych stosuje się techniki pomiarowe oparte na metodzie wizualizacji przepływu i metodzie znaczników gazowych [21, 22]. W przypadku zagrożeń związanych z obecnością zanieczyszczeń gazowych montowane są różnego rodzaju systemy detekcji gazów.

Przykładowo, dla zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa w zakładach o dużym ryzyku wystąpienia awarii przemysłowej, np. w hucie, wskazane jest wprowadzenie zaawansowanego systemu detekcji, które będą sygnalizować o niebezpiecznych stężeniach gazów, jak również mogą włączać urządzenia ograniczające lub niwelujące zagrożenie wybuchem [23]. System detekcji gazów mogą tworzyć trzy grupy urządzeń, a mianowicie: detektory, moduły (centrale) alarmowe oraz urządzenia wykonawcze. Zaawansowane systemy detekcji gazów znajdują zastosowanie w wielu technologiach, instalacjach oraz gałęziach przemysłowych, a w szczególności w przemyśle: wydobywczym ropy i gazu ziemnego, rafineryjno-petrochemicznym, chemicznym, zbrojeniowym, hutniczym, jak również lakierniach, hangarach lotniczych, składach amunicji, instalacjach turbin i generatorów, w miejscach składowania i dystrybucji paliw oraz materiałów wybuchowych i wielu innych [23].

Systemy detekcji mogą wykrywać następujące czynniki [24]:

- produkty spalania w postaci dymu i aerozoli (czujki dymu);
- ciepło (czujki ciepła);
- promieniowanie elektromagnetyczne w paśmie podczerwieni i ultrafioletu (czujki płomienia);
- gazy pożarowe powstające podczas spalania (czujki gazu).

Należy w tym miejscu wspomnieć, że czujki płomienia wykrywają pożary płomieniowe szybciej niż czujki ciepła i czujki dymu [23].

Przykładem zaawansowanego systemu detekcji jest stacjonarny, dwuprogowy system detekcji firmy GAZEX. System wyposażony jest w dwuprogowe moduły alarmowe typu MD-2 (detektor tlenu) i MD-4 (detektory: propanu-

-butanu, siarkowodoru, tlenku węgla oraz metanu) [25]. System umożliwia wykrywanie i sygnalizację obecności gazów szkodliwych lub niebezpiecznych dla ludzi w środowisku pracy i życia, występujących nawet w bardzo niskich stężeniach (tabela 1). System ten zamontowany jest w Laboratorium Inżynierii Bezpieczeństwa mieszczącym się w Katedrze Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej.

Tabela 1. Zakresy stężeń analizowanych przez system detekcji gazów [25]

Medium	Jednostka	Zakres pomiarowy	Stężenie chwilowo dopuszczalne
Metan	%DGW	0 ÷ 100	110*
Propan-butan	%DGW	0 ÷ 100	110*
Tlenek węgla	ppm	0÷ 500	1500**
Siarkowodór	ppm	0÷ 100	500**
Tlen	% v/v	0÷ 25	30**

* chwilowa, dopuszczalna wartość stężenia <1 min/30 min

** chwilowa, dopuszczalna wartość stężenia <1 min/8 h

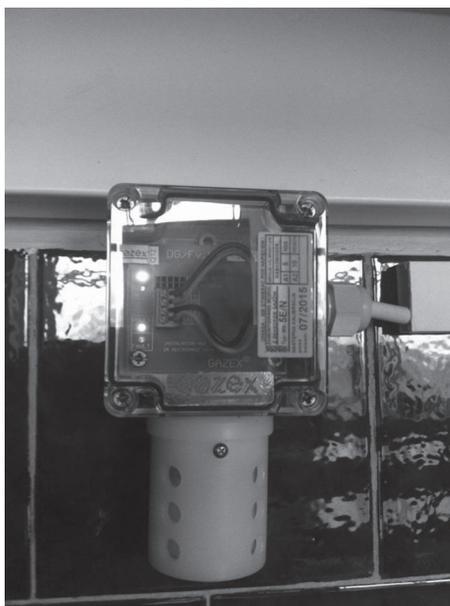
Źródło: [25]

Dużą zaletą dwuprogowego systemu detekcji firmy GAZEX jest możliwość pomiaru niskich wartości stężeń, co może całkowicie wyeliminować zagrożenia związane z zatruciem, np. tlenkiem węgla (przy 400 ppm CO występują silne bóle głowy i mdłości, natomiast powyżej 800 ppm może dojść już do utraty przytomności). System ten, ze względu na specyfikę analizowanych gazów, a w szczególności możliwość wykrywania siarkowodoru, składnika gazu koksowniczego, może być montowany w zakładach, takich jak huta.

Na rys. 4–7 przedstawiono rozmieszczenie, detektorów w sali laboratorium, które jest ściśle związane z gęstością analizowanych przez system detekcji związków.



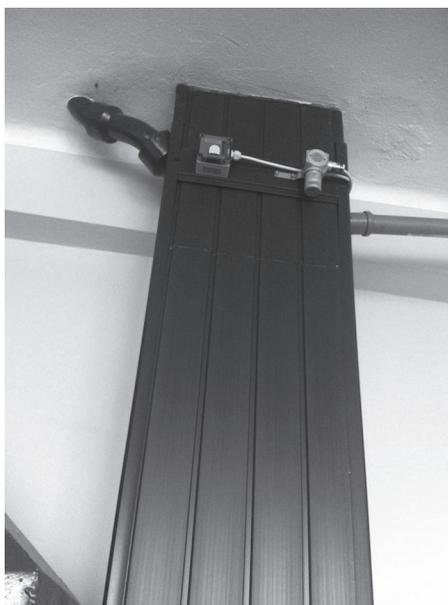
Rys. 4. Umieszczenie detektora dla gazu propan – butan (30 cm nad podłożem)
Źródło: opracowanie własne



Rys. 5. Umieszczenie detektora do wykrywania siarkowodoru (wysokości wzroku pracującego człowieka)
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Umieszczenie detektora do wykrywania tlenu (180 cm od podłoża)
Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Umieszczenie detektorów do wykrywania metanu i tlenku węgla
(30 cm od stropu) Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie

Przedstawione zagrożenia możliwe do wystąpienia w przemyśle hutniczym, ze względu na specyfikę tego sektora, związane są w szczególności z obecnością na terenie zakładu niebezpiecznych pyłów i gazów, takich jak gaz koksowniczy czy gaz ziemny. Niewłaściwe użytkowanie i postępowanie z gazami palnymi, w tym technicznymi, wynikające często z winy człowieka, uszkodzenie lub rozszczelnienie rurociągów mogą być przyczyną niekontrolowanego uwalniania się gazów, a w konsekwencji pożaru lub wybuchu. Odpowiednio szybka identyfikacja zagrożenia może zminimalizować, a nawet wyeliminować ryzyko jego wystąpienia. Zaproponowany w niniejszym artykule system detekcji gazów stanowi istotny element bezpieczeństwa każdego zakładu przemysłowego, na terenie którego występują gazy palne. Opisany system może ponadto ograniczyć skutki bezpośredniego zagrożenia zatruciem lub utratą życia ludzi znajdujących się w pobliżu miejsca uwalniania się gazów.

W celu zapobiegania powstaniu na terenie zakładu awarii przemysłowej oraz ograniczenia jej ewentualnych skutków podobne środki bezpieczeństwa wprowadzano w Hucie Szkła Guardian w Częstochowie, montując system detekcji gazów palnych i dwutlenku siarki [26].

Należy podkreślić, że zaproponowany system detekcji gazów sprawdzany był w warunkach laboratoryjnych. Natomiast na chwilę obecną celowość montażu wspomnianego systemu stoi pod znakiem zapytania w środowisku narażonym na ciągłą obecność zanieczyszczeń, tak jak to ma miejsce w analizowanym wydziale stalowni. Nie ma również możliwości obudowania pieca. Jedynym sposobem minimalizacji emitowanych w sposób niekontrolowany gazów i pyłów jest usprawnienie systemu odbioru gazów. Przy dużej intensywności wydzielających się gazów kolektory poziome istniejącego układu wtórnego pod stropem nie przejmują całej objętości, co skutkuje rozprzestrzenianiem się tych gazów w górnej części hali od strony suwnic. Dodatkowo, rozprzestrzenianie się gazów po hali wzrasta podczas załadunku pieca. Gazy odbijają się od kosza i konstrukcji suwnicy. Ich odbiór przez układ wtórny jest utrudniony. Należałoby rozpatrzyć możliwość budowy częściowego okapu wspartego na konstrukcji hali za kolektorem od strony nadjeżdżających suwnic. Okap wspomogłoby ukierunkowanie ruchu gazów do kolektorów. Ponadto, należy rozpatrzyć możliwość usytuowania

w dolnej części środkowego kolektora dodatkowych wlotów, które zwiększą intensywność odsysania gazów bezpośrednio nad piecem. Należy również wspomnieć, że kolano układu pierwotnego usytuowane w sklepieniu pieca, jak również kolano ruchome i kanał stały do komory osadczej mają za mały przekrój wewnętrzny, co skutkuje zbyt dużą prędkością odsysanych gazów. Duża prędkość powoduje nadmierne porywanie cząstek stałych z pieca. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów układ pierwotny przejmuje około 10 % strumienia ogólnego gazów, kierowanych do odpylni. Taki stan nie zapewnia odpowiedniego rozkładu ciśnienia w piecu. W środkowej części pieca pod sklepieniem występuję znaczne nadciśnienie, co powoduje „wybijanie” gazów przez nieszczelności przy elektrodach. Jednocześnie układem pierwotnym odsysa się około 95% ogólnej objętości gazów wydzielanych w piecu. Szacuje się, że od 5–10% gazów z pieca uchodzi w sposób niekontrolowany do układu wtórnego.

Literatura

- [1] SIROLL-Furnace-Optimization-en.pdf, www.industry.siemens.com (dostęp: 27.05.2016).
- [2] Senarega M., Marasso M., Mori C., Carbonaro M., Pusher reheat furnace at Metinvest Trameal. Millennium Steel India 2010, pp. 74–78.
- [3] Reheating furnaces: A complete product line of furnace equipment providing proven and innovative technologies. Tenova, LOI ITALIMPIANTI, www.tenovagroup.com (dostęp: 19.05.2016).
- [4] Pusher Reheat Furnace Collaboration: A success story. Industriail Heating, June 2006. www.industrialheating.com/articles/86940-pusher-reheat-furnace-collaboration-br-a-success-story?v=preview (dostęp: 19.05.2016).
- [5] Biedermann K., Restrukturyzacja i modernizacja hutnictwa żelaza Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego po 1989 roku. Prace Komisji Geografii Przemysłu, Wydaw. Oświat. FOSZE, Rzeszów 2002.
- [6] Burchart-Korol D., Środowiskowa ocena technologii hutnictwa żelaza i stali na podstawie LCA, Prace Naukowe GIG, *Górnictwo i Środowisko* 2010, nr 3, s. 5–12.
- [7] Zajemska M., Modelowanie numeryczne składu chemicznego spalin w piecach grzewczych. Wyd. Wydziału IPMiFS Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013.

- [8] Burggraaf B.T., Lewis B., Hoppesteyn P.D.J., Fricker N., Santos S., Slim B.K., Towards industrial application of high efficiency combustion, *IFRF Combustion Journal*, 2007, July, Article Number 20070.
- [9] Lee C. L., Jou C. J. G., Integrated methods to improve efficiency of furnace burning recovered tail gas, *International Journal of Hydrogen Energy* 2012, no. 37, pp. 6620–6625.
- [10] Lee C.L., Jou C.J.G., Saving fuel consumption and reducing pollution emissions for industrial furnace, *Fuel Processing Technology* 2011, no. 92, pp. 2335–2340.
- [11] Choi G. M., Katsuki M., Chemical kinetic study on the reduction of nitric oxide in highly preheated air combustion, *Proceedings of the Combustion Institute* 2002, no. 29, pp. 1165–1171.
- [12] Baukal Ch. E., Hong J., Buszman W., Waibel R. T., Controlling emissions during cold furnace startup, *Chemical Engineering Progress, Environmental Management* 2007, no. 2, pp. 42–46.
- [13] Raport o Bezpieczeństwie ArcelorMittal Poland S.A. Oddział w Zdzieszowicach dla Zakładu o dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej (ZDR), Zdzieszowice 2013, dokument elektroniczny.
- [14] Domański W., Transport i magazynowanie gazów technicznych, „Prace Naukowe Akademii Jana Długosza w Częstochowie, *Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa* 2013, nr 1, s. 57–67.
- [15] www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2015/T2/t2_0407.pdf (dostęp: 19.05.2016).
- [16] Sawicki T., Wybuchy przestrzenne, *Bezpieczeństwo Pracy* 2005, nr 11, s. 22–25.
- [17] Gawęda E., Zagrożenia chemiczne i pyłowe w procesach produkcji wyrobów metalowych, *Bezpieczeństwo Pracy* 2008, nr 4, s. 7–11.
- [18] Kucharczyk A., Zagrożenia chemiczne w pracy strażaka, *Przegląd Pożarniczy* 2011, nr 12, s. 14–17.
- [19] Karcz A., Problemy zagospodarowania gazu koksowniczego, *Polityka Energetyczna* 2005, t. 8, s. 91–100.
- [20] Gawęda E., Arsen i jego związki w środowisku pracy – zagrożenia, ocena narażenia, *Bezpieczeństwo Pracy* 2005, nr 3, s. 26–28.
- [21] Jankowski T., Jankowska E., Wykorzystanie metod wizualizacji przepływu powietrza i znaczników gazowych w badaniach rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w pomieszczeniu pracy, *Bezpieczeństwo Pracy* 2005, nr 5, s. 10–12.

- [22] Jankowski T., Znaczniki gazowe w ocenie emisji zanieczyszczeń przenoszonych powietrzem, *Bezpieczeństwo Pracy* 2009, nr 2, s. 14–17.
- [23] <http://k-bausysteme.pl/oferta/39,systemy-detekcji-gazow.html>; (dostęp: 22.06.2016).
- [24] Markowski W., Czulość czujek pożarowych, cz. I, *Systemy alarmowe* 2008, nr 2, s. 54–58.
- [25] http://www.gazex.com.pl/pdf/dtr_DEX_P.pdf (dostęp: 05.04.2017).
- [26] Informacja o środkach bezpieczeństwa i sposobie postępowania w przypadku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej na terenie huty szkła Guardian Częstochowa Sp. z o. o., dokument elektroniczny, www.guardian-czestochowa.com; (dostęp: 22.09.2016).