

Konstrukcje kominów przemysłowych do odprowadzania odsiarczonych spalin

"TECH-BUD'2017"

Dr hab. inż. Rajmund Oruba, prof. AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

1. Wprowadzenie

Podstawowym źródłem zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego tlenkami siarki, tlenkami azotu i pyłem są spaliny z elektrowni i elektrociepłowni opalanych węglem kamiennym lub brunatnym. Zakwaszenie atmosfery powoduje głównie SO_2 , którego zawartość w spalinach nieoczyszczonych może dochodzić nawet do 6000 mg/m^3 [3]. Podstawową metodą ochrony środowiska naturalnego pod tym względem była przez wiele lat dyspersja spalin z otaczającym powietrzem. Aby uzyskać właściwy efekt, budowano bardzo wysokie kominy przemysłowe, których wysokość przekraczała nawet 300 m. W Polsce były to najczęściej kominy jedno-przewodowe z żelbetowym, monolitycznym trzonem nośnym. Na wspornikach wykształconych po wewnętrznej stronie trzonu co około 10 m spoczywały segmenty ceramicznej wymurówki wewnętrznej. Pomiędzy trzonem żelbetowym a wymurówką znajdowała się warstwa izolacji termicznej. Temperatura nieodsiarczonych spalin na wlocie do komina wynosiła od $+150$ do $+260^\circ\text{C}$. Im wyższa była temperatura i prędkość spalin, tym większe było ich wynoszenie, którego skutek jest porównywalny z większą wysokością komina. Pomimo dużej zawartości kwasowych związków siarki – gorące, suche spaliny nie powodowały intensywnej, korozyjnej degradacji konstrukcji kominów.

Ze względu na postępujący proces pogarszania się jakości powietrza stwierdzono, że dalsze funkcjonowanie elektrowni konwencjonalnych nie będzie możliwe bez skutecznych technologii oczyszczania spalin. Dobrze zorganizowane środowiska ekologiczne wymusiły stosowanie procesów odsiarczania spalin. Instalacje odsiarczania spalin (IOS) zaczęto stosować w latach 80. XX wieku. Spośród wielu technologii odsiarczania najbardziej rozpowszechnione są metody: sucha, półsucha, mokra oraz kotły fluidalne. Największą skutecznością charakteryzuje się metoda mokra (mokra-wapienna MOWAP), obniżająca zawartość SO_2 w spalinach poniżej 200 mg/m^3 .

Zastosowanie IOS powoduje obniżenie temperatury i wzrost wilgotności spalin wprowadzanych do komina. W mokrej metodzie odsiarczania temperatura spalin z reguły nie przekracza wartości $+60^\circ\text{C}$, a ich wilgotność jest większa od 20%. Przyczynia się to do powstawania kondensatu spalin i jego agresywnego oddziaływania

na konstrukcje kominów. Zjawisko to stwarza bardzo duże problemy na etapie projektowania i eksploatacji, gdyż wymaga zastosowania takich materiałów do wykonania przewodów kominowych, które będą charakteryzowały się ekstremalną odpornością na korozję. Wykorzystanie starych kominów, bez specjalistycznego i wcześniejszego ich przystosowania jest niewskazane, gdyż zwiększenie wilgotności materiałów konstrukcyjnych nasyconych kwasowymi związkami siarki może spowodować ich korozyjną degradację. Należy dodać, że spaliny z mokrej instalacji odsiarczania można także odprowadzać przez żelbetowe hiperboloidalne chłodnie kominowe. Wówczas spaliny unoszone są do atmosfery wraz z parą wodną z chłodni kominowych.

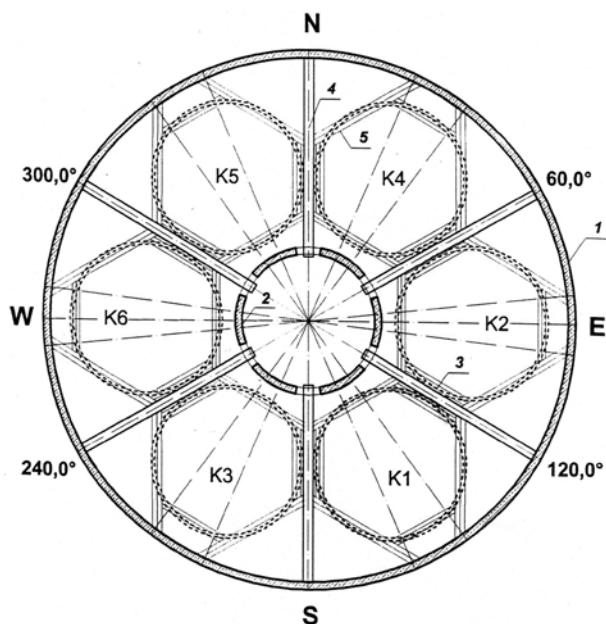
2. Ogólne wymagania dotyczące kominów przemysłowych do odprowadzania spalin z IOS

Szczegółowe rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe kominów przemysłowych służących do odprowadzania odsiarczonych spalin są uzależnione od wielu czynników. Główne z nich dotyczą parametrów odprowadzanych spalin, m.in. ilość, skład chemiczny, temperatura, wilgotność oraz prędkość spalin. Są one ściśle związane z przyjętą metodą odsiarczania.

W trakcie eksploatacji kominów należy się liczyć z wykraplaniem się w przewodach spalin kwaśnego kondensatu stwarzającego duże zagrożenie korozyjne.

Dodatkowym problemem, który należy uwzględnić w projektowaniu tych obiektów, jest ewentualna konieczność eksploatacji także w przypadku wystąpienia awarii IOS (system *by-pass*). Wówczas nieodsiarczone, gorące spaliny kierowane są w krótkim czasie do komina, powodując wstrząs termiczny ścian przewodu spalin. Przekrój poprzeczny przewodów spalin jest uzależniony od ilości i wymaganej prędkości spalin. Zastosowanie IOS powoduje znaczną redukcję chemicznych skażeń w spalinach, a więc nie ma potrzeby budowy bardzo wysokich kominów. Ich wysokość z reguły nie przekracza 150 m.

Najlepszym rozwiązaniem dla konkretnej instalacji odsiarczającej jest budowa nowego komina odprowadzającego spaliny. Można wówczas dokładnie dostosować rozwiązania konstrukcyjne komina do przewidywanych parametrów spalin i warunków eksploatacji.



Rys. 1. Przekrój poziomy komina sześcioprzewodowego – schemat [6]; 1 – zewnętrzny trzon żelbetowy o średnicy 21,4 m, 2 – wewnętrzny trzon żelbetowy o średnicy 5,9 m, 3 – przewody spalin o średnicy 5,3 m

3. Podstawowe rozwiązania konstrukcyjne kominów przemysłowych do odprowadzania spalin IOS

3.1. Kominy wieloprzewodowe

Kominy wieloprzewodowe z zachowaniem przestrzeni wentylowanej pomiędzy przewodami spalin a żelbetowymi trzonami nośnymi są dość powszechnie stosowane [4, 5, 6]. Idea konstrukcyjna tych kominów polega na odseparowaniu wpływu agresywnych spalin od konstrukcji nośnych trzonów żelbetowych. Spaliny prowadzone są wewnętrznymi przewodami spalin. W takim kominie może być od 1 do 6 przewodów spalin. Najczęściej występuje jeden zewnętrzny, żelbetowy trzon nośny. W przypadku większej liczby przewodów spalin stosuje się dwa współśrodkowe trzony – zewnętrzny i wewnętrzny (rys. 1). Rodzaj materiału, z jakiego wykonuje się przewody spalin, jest uzależniony od parametrów spalin z IOS. Przewody spalin znajdują się na stalowych lub żelbetowych stropach wewnętrznych. Stosowanie zasady, że jeden przewód spalin obsługuje jeden blok energetyczny, umożliwi wyłączenie ich w celach remontowych poszczególnych bloków w elektrowni.

3.2. Żelbetowe kominy jedнопrzewodowe z wykładziną z bloczków z piankowego szkła borokrzemianowego

Stosunkowo nowym rozwiązaniem konstrukcyjnym kominów do odprowadzania odsiarczonych spalin jest aplikowanie wykładziny z bloczków z piankowego szkła borokrzemianowego bezpośrednio na wewnętrzną



fol. Rejmund Onuba

Rys. 2. Komin jedнопrzewodowy z TWS posadowiony na absorberze

powierzchnię żelbetowego trzonu komina jedнопrzewodowego (New Chimney Design – NCD) [2, 5]. Wykładzina ze szkła borokrzemianowego pełni funkcję izolacji termicznej trzonu żelbetowego i równocześnie wykazuje ekstremalną odporność na agresję chemiczną oddziaływania kondensatu spalin.

Z zewnątrz kominy te są podobne do tradycyjnych kominów jedнопrzewodowych. Takie obiekty mają prostą konstrukcję i są tańsze od kominów z wewnętrznymi przewodami spalin.

3.3. Kominy zabudowane nad absorberami

Kominy posadowione bezpośrednio na absorberach stosowanych w procesie mokrego odsiarczania spalin stanowią proste rozwiązanie konstrukcyjne (rys. 2). Kominy takie mogą być zlokalizowane także w bezpośrednim sąsiedztwie absorbera. Stateczność stalowego przewodu spalin zapewnia stalowa, zewnętrzna konstrukcja kratowa. Przewody spalin tych kominów wykonuje się najczęściej z tworzyw wzmocnionych włóknem szklanym (TWS). Rura przewodu spalin przejmuje obciążenie od wiatru, które przekazywane jest na stalową konstrukcję wsporczą.

4. Materiały do wykonywania przewodów spalin odsiarczonych

Przewody spalin w kominach współpracujących z IOS pełnią podstawową funkcję w procesie odprowadzania odsiarczonych spalin. Materiały, z jakich wykonuje się te przewody, muszą charakteryzować się bardzo dużą odpornością na korozyjne oddziaływanie silnie agresywnego kondensatu. Do wykonywania przewodów spalin odsiarczonych najczęściej stosuje się materiały:

- ceramiczne kształtki kwasoodporne łączone kitem kwasoodpornym,
- stal o podwyższonej odporności na korozję z powłokami chemooodpornymi od strony spalin,
- bloczki z piankowego szkła borokrzemianowego,
- tworzywa wzmocnione włóknem szklanym TWS.

Ściany przewodów spalin z ceramicznych kształtek kwasoodpornych, np. typu S-4 łączonych na „pióro i wpust” na kicie kwasoodpornym wykazują dużą odporność na oddziaływanie kwaśnego kondensatu. Segmenty przewodów spalin najczęściej znajdują się na stalowych stropach wewnętrznych, występujących co około 25 m (rys. 3). Niestety, w przypadku nadciśnienia spalin nie zapewniają szczelności. Najślabszym elementem, pod tym względem, są spoiny pionowe. Kondensat przedostający się na zewnątrz murowanej ściany przewodu może spowodować korozyjną degradację wszystkich elementów i urządzeń w kominie. Ponadto zaprawy i kity łączące kształtki ceramiczne mogą ulegać korozji na skutek działania kwasu fluorowodorowego zawartego w spalinach. Ceramiczne przewody spalin można stosować dla suchej metody odsiarczania i przy kotłach fluidalnych.

Stal o podwyższonej odporności na korozję z powłokami chemooodpornymi może być stosowana do wykonywania wewnętrznych przewodów spalin w kominach związanych ze wszystkimi rodzajami IOS. Z uwagi na duże zagrożenie korozyjne stal musi być specjalnie zabezpieczona od strony przepływających spalin. Najczęściej

są to powłoki winyloestrowe o bardzo wysokiej chemooodporności z wypełniaczami mineralnymi (płatki szklane, mika, węgiel krzemu itp.). Szczególnie skuteczne musi być zabezpieczenie chemooodporne dla kominów tzw. mokrych, odprowadzających spalinę odsiarczoną metodą mokrą MOWAP. Zamiast stali zwykłej z powłokami ochronnymi można zastosować kwasoodporną stal stopową bez dodatkowych zabezpieczeń. Z powodu bardzo wysokich kosztów i ograniczonej odporności takiej stali na działanie korozyjne chlorków i fluorków w środowisku kwaśnym rozwiązanie to aktualnie nie jest zalecane.

Bloczki z piankowego szkła borokrzemianowego stosuje się do wykonywania chemooodpornych wykładzin wewnętrznych w przewodach spalin dla wszystkich metod odsiarczania (rys. 4) [2, 5]. Bloczki wykładzinowe, najczęściej o grubości 51 mm, klejone są do podłoża lepiszczem uretanowym zachowującym trwałą elastyczność do temperatury +93°C. Ten system wykładzinowy wykazuje bardzo wysoką chemooodporność przy równoczesnym zapewnieniu dobrej izolacji termicznej od strony spalin. Charakteryzuje się dużą odpornością na wysokie temperatury i wstrząsy termiczne. Można go aplikować na powierzchniach stalowych, betonowych, ceramicznych i z TWS. W przypadku dużej zawartości fluoru w spalinach wykładzina ze szkła borokrzemianowego może ulegać niewielkim, powierzchniowym destrukcjom. Tworzywa wzmocnione włóknem szklanym TWS (*Fiberglass Reinforced Plastic FRP*, *Glasfaserverstärkter Kunststoff GFK*) są to wielowarstwowe tworzywa z chemooodpornymi żywicami wzmocnianymi włóknem szklanym [1, 5]. Liczba warstw i ich właściwości są dobierane w zależności od warunków eksploatacji (temperatura, wilgotność, skład spalin, nadciśnienie, wysokość przewodu spalin). Grubość laminatu konstrukcyjnego warstwy nośnej przenoszącej obciążenia wynosi około 20 mm. Od strony wewnętrznej przewodu występuje powłoka chemooodporna CBL grubości 2 mm, a od zewnątrz warstwa izolacji termicznej, np. pianka PIR



fot. Rajmund Oruba

Rys. 3. Wewnętrzny strop stalowy, na którym spoczywają ceramiczne przewody spalin w kominie sześcioprzewodowym



fot. Rajmund Oruba

Rys. 4. Widok wykładziny wewnętrznej z piankowego szkła borokrzemianowego

grubości około 50 mm z zewnętrzną powłoką ochronną (rys. 5). Ze względu na możliwość zapewnienia całkowitej szczelności i ekstremalnej chemoodporności materiał ten szczególnie nadaje się do odprowadzania spalin z instalacji mokrego odsiarczania spalin MOWAP bez wtórnego podgrzewania spalin. Po zastosowaniu specjalnych rozwiązań materiałowych TWS można także stosować dla spalin gorących w awaryjnych sytuacjach eksploatacyjnych (*by-pass*). Propozycje materiałowe do wykonywania przewodów spalin dla różnych technologii IOS zestawiono w tabeli 1 [3, 6].

5. Warunki eksploatacji kominów współpracujących z instalacjami odsiarczania spalin

Głównym problemem w trakcie eksploatacji kominów odprowadzających spaliny z IOS jest wykraplanie się na ścianach przewodów spalin silnie agresywnego kondensatu ($pH = 1,1$ do $3,0$) powodującego zagrożenie korozyjne [4, 5, 6]. Duża wilgotność spalin zawierających tlenki siarki powoduje, że temperatura kwasowego punktu rosy spalin T_{ADP} jest dużo wyższa od temperatury spalin. W związku z tym kondensacja spalin występuje w ciągu całego okresu eksploatacji kominu. Zjawisko to jest szczególnie intensywne przy stosowaniu mokrej metody odsiarczania. Aby zapewnić odpowiednią trwałość i niezawodność eksploatacyjną, należy do wykonania przewodów spalin i ich wykładzin wewnętrznych stosować materiały o dużej chemoodporności. Należy także zapewnić skuteczne odprowadzanie kondensatu, spływającego po ścianach przewodów spalin, specjalnymi instalacjami i gromadzenie go w przeznaczonych do tego celu zbiornikach (rys. 6, 7).

Ze względu na konieczność zapewnienia szczelności przewodów spalin, zwłaszcza przy możliwości występowania ich nadciśnienia, nie należy stosować dylatacji poziomych lub styków konstrukcyjnych, gdyż stanowi to potencjalne źródło nieszczelności.

Dodatkowe wymagania materiałowo-konstrukcyjne mogą wystąpić w przypadku konieczności eksploatacji kominów także w trakcie awarii IOS [4, 6]. Wówczas gorące, nieodsiarczone spaliny o temperaturze około $+160^{\circ}\text{C}$ kierowane są kanałami obejściowymi (*by-pass*) wprost do przewodów spalin w kominie. Występuje wtedy wstrząs termiczny, który może spowodować uszkodzenie konstrukcji przewodu spalin lub jego wykładziny wewnętrznej. Skutecznym sposobem rozwiązania problemu eksploatacji bloku energetycznego, w trakcie awarii IOS, może być odprowadzanie gorących spalin do dodatkowego, specjalnie do tego celu przeznaczonego, stalowego przewodu spalin zlokalizowanego wewnątrz tego samego trzonu żelbetowego. Przewód taki jest wykorzystywany tylko w stanach awaryjnych IOS. Krótkotrwały wzrost temperatury spalin występuje także w momentach uruchamiania oraz wyłączenia bloku energetycznego z eksploatacji.



fol. Rajmunda Orłuba

Rys. 5. Prefabrykowane segmenty przewodów spalin z TWS przygotowane do montażu wewnątrz kominu wieloprzewodowego

Tabela 1. Propozycje materiałowe do wykonywania przewodów spalin dla IOS

Lp.	Technologia IOS	Materiały do wykonania wewnętrznych przewodów spalin
1	Metoda sucha Kotły fluidalne	<ul style="list-style-type: none"> – wymurówka z ceramiki kwasoodpornej, – stal o podwyższonej odporności na korozję z powłoką chemoodporną, – wykładzina z borokrzemianowego szkła piankowego
2	Metoda półsucha	<ul style="list-style-type: none"> – stal o podwyższonej odporności na korozję z powłoką chemoodporną, – stal kwasoodporna, – wykładzina z borokrzemianowego szkła piankowego, – tworzywo wzmocnione włóknem szklanym TWS
3	Metoda mokra	<ul style="list-style-type: none"> – stal o podwyższonej odporności na korozję z powłoką chemoodporną, – stal kwasoodporna, – wykładzina z borokrzemianowego szkła piankowego, – tworzywo wzmocnione włóknem szklanym TWS



fol. Rajmunda Orłuba

Rys. 6. Instalacja odprowadzania kondensatu spalin z dolnej części przewodu spalin



foto: Rajmund Oruba

Rys. 7. Zbiornik kondensatu spalin w kominie

Wysokie wymagania odporności korozyjnej materiałów oraz konieczność pracy komina także w wysokiej temperaturze w trakcie awarii IOS powodują znaczący wzrost kosztów inwestycji.

Należy zwrócić również uwagę na prędkość spalin w przewodach. Przy prędkości spalin powyżej 16 m/s może występować odrywanie się kropeł kondensatu z wewnętrznej powierzchni przewodu spalin i unoszenie ich do atmosfery na zewnątrz komina. Minimalna prędkość, przy której następuje odrywanie się kropeł kondensatu, zależy od rodzaju wykładziny wewnętrznej w przewodach kominowych.

6. Podsumowanie

Coraz ostrzejsze wymagania prawa ekologicznego wymuszają stosowanie efektywnych metod oczyszczania spalin w elektrowniach i elektrociepłowniach.

Instalacje odsiarczania spalin powodują obniżenie ich temperatury oraz zwiększenie wilgotności, co przyczynia się do wykrapłania kondensatu spalin w ich przewodach. Kwaśny, silnie agresywny kondensat stwarza zagrożenie korozyjne dla konstrukcji kominów.

Podstawowe rozwiązania konstrukcyjne kominów współpracujących z instalacjami odsiarczania spalin to: kominy wieloprzewodowe, żelbetowe kominy jednoprzewodowe z wykładziną z piankowego szkła borokrzemianowego oraz kominy z zewnętrznymi kratowymi konstrukcjami wsporczymi zabudowane nad absorberami.

Do wykonywania przewodów spalin w kominach odprowadzających odsiarczone spaliny najczęściej stosuje się: ceramikę kwasoodporną, stal z powłokami chemoodpornymi, wykładziny z borokrzemianowego szkła piankowego oraz tworzywa wzmocnione włóknem szklanym TWS.

Największą chemoodpornością muszą charakteryzować się przewody spalin w kominach współpracujących z mokrymi instalacjami odsiarczającymi.

Artykuł opracowano w ramach badań statutowych Akademii Górniczo-Hutniczej nr 11.11.150.005.

Referat był wygłoszony na III Konferencji TECH-BUD'2017.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CICIND, Model Code for GRP Liners in Chimneys, Zürich, 2008
- [2] Harling A., Van der Vonde B., Noakowski P., De Kreijl A., New Chimney Design NCD 2.0, Further Development of the Chimney Type – Comparison of Chimneys with Brick Flue, Steel/FRP Flue and Borosilicate Lining, CICIND REPORT, tom 32, 2/2016, str. 119–132
- [3] Hawro L., Smoleński R., Oruba R., Adaptacja starych kominów żelbetowych do odprowadzania odsiarczonych spalin, Materiały Budowlane 5/2016, str. 36–37
- [4] Oruba R., Oddziaływanie środowiska przemysłowego i eksploatacji górniczej na bezpieczeństwo żelbetowych kominów przemysłowych, Monografia 211, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010
- [5] The CICIND Chimney Book, CICIND, Zürich, 2005
- [6] Prace naukowo-badawcze dotyczące kominów do odprowadzania odsiarczonych spalin w elektrowniach, Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 1996–2016

**Za publikację w miesięczniku „Przegląd Budowlany”
uzyskuje się 5 punktów
serdecznie zapraszamy autorów do publikowania
w „Przeglądzie Budowlanym”**

zgodnie z komunikatem MNiSW z dnia 23.12.2015 roku, wykaz B, pozycja 1381.