
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 31
(październik–grudzień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

Rok X

Warszawa–Opole 2017

JERZY DUDA*

MARIUSZ KOŁOSOWSKI**

JACEK TOMASIAK***

Sposób ograniczenia strat cieplnych bypassa

Słowa kluczowe: piec obrotowy, bypass, zużycie ciepła, ORC.

Wraz z rozwojem nowych, suchych metod wypalania klinkieru w piecach z wielostopniowymi podgrzewaczami surowca, pojawiły się nowe problemy technologicznie związane z tworzeniem się narostów w wymiennikach ciepła. Narosty te powstają w wyniku obiegu składników lotnych: alkaliów, siarki i chloru. Istotnym źródłem składników lotnych (oprócz surowca i pyłu węglowego) są paliwa alternatywne. Obserwowany w ostatnich latach intensywny wzrost udziału paliw alternatywnych w procesie wypalania klinkieru spowodował konieczność ograniczenia obiegu składników lotnych w instalacji piecowej poprzez zastosowanie bypassa, polegającego na wyprowadzeniu w zależności od zawartości składników lotnych 3–20% części gazów poza piec, z pominięciem wymiennika ciepła. Każdy procent bocznikowanych gazów powoduje wzrost zużycia ciepła w procesie wypalania o ok. 20–25 kJ/kgkl. W związku z tym dąży się do ograniczenia wielkości bypassa. Efekty ekologiczne i ekonomiczne z wykorzystania paliw alternatywnych powodują, że udział tych paliw stale rośnie, co skutkuje wzrostem obiegu składników lotnych i tym samym istnieje konieczność zwiększenia wielkości bocznikowanych gazów. W artykule przedstawiono jeden ze sposobów ograniczenia strat cieplnych w procesie wypalania klinkieru wynikających z zastosowania bypassa, polegający na wykorzystaniu entalpii gazów bypassowych do produkcji energii elektrycznej.

1. Wprowadzenie

Nowoczesne piece obrotowe wyposażone w wielostopniowe wymienniki cyklonowe o coraz wyższej sprawności odpyleniowej gazów sprzyjają powstawaniu obiegu składników lotnych – chloru, siarki i alkaliów [1]. W typowym, najczęściej stosowanym systemie powiązań gazowych (piec obrotowy–zewewnętrzny wymiennik ciepła–młyn surowca) można wyróżnić dwa obiegi składników lotnych: wewnętrzny i zewnętrzny.

Wprowadzone z nadawą surowcową i paliwem do instalacji piecowej alkalia, siarka i chlor w temperaturze > 1100 K przechodzą ze stanu stałego w stan

* Dr hab. inż., prof. PWSZ, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie, jerzy.duda@pwsz.nysa.pl

** Dr inż., Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie, mariusz.kolosowski@pwsz.nysa.pl

*** Mgr inż., Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie, jacek.tomasiak@pwsz.nysa.pl

lotny, reagując w fazie gazowej ze sobą. Następnie, wraz z gazami piecowymi, przepływają do zimniejszych stref pieca (wymiennika zewnętrznego), gdzie ulegają kondensacji na surowcu w postaci siarczanów lub chlorków i wracają z surowcem do gorących stref pieca, gdzie ponownie przechodzą w stan lotny. Proces ten jest określany jako tzw. wewnętrzny obieg składników lotnych. W wyniku powtarzającego się cyklu – obiegu powstają w fazie gazowej w piecu wysokie, niebezpieczne technologicznie koncentracje składników lotnych, które wielokrotnie przekraczają sumaryczną zawartość tych składników, wprowadzanych do procesu z surowcem i paliwem. Przekroczenie stanu równowagi pomiędzy ilością wprowadzonych do procesu składników lotnych i wyprowadzonych z procesu z klinkierem oraz z unosem pyłowym grozi tworzeniem się narostów na wlocie pieca i w dolnej części wymiennika. Tworzenie się narostów może spowodować zatrzymanie procesu (brak przepływu gazów piecowych), w związku z tym stosuje się różne technologiczne sposoby ograniczenia tego zjawiska oraz usuwania narostów.

Parametrami, które charakteryzują zdolność do powstania obiegu wewnętrznego składników lotnych są: współczynnik cyrkulacji K określany jako stosunek ilości substancji lotnych na wlocie pieca do ilości w nadawie piecowej i paliwie oraz współczynnik wiązania R , który jest stosunkiem ilości substancji lotnych w klinkierze do ilości w nadawie piecowej i paliwie.

Natomiast obieg zewnętrzny składników lotnych tworzą składniki lotne wyprowadzone z pieca wraz z pyłem w gazach odlotowych, które po wytrąceniu w urządzeniu odpylającym są ponownie zawrócone do procesu wypalania. W nowoczesnych instalacjach piecowych, wyposażonych w urządzenia odpylające gazy odlotowe o wysokiej sprawności, można przyjąć, że układ piec-wymiennik-odpylacz jest praktycznie uszczelniony pyłowo, co skutkuje powstaniem zamkniętego obiegu składników lotnych.

Na wielkość obiegu wewnętrznego duży wpływ ma zdolność odparowania poszczególnych składników lotnych oraz sprawność zewnętrznego wymiennika ciepła. Nowoczesne o wysokiej sprawności odpyleniowej wielostopniowe wymienniki cyklonowe powodują, że w instalacjach tych praktycznie tworzy się zamknięty obieg wewnętrzny. W tabeli 1 przedstawiono typowe zdolności odparowania składników lotnych w piecu.

T a b e l a 1

Stopień odparowania w piecu w zależności od typu wymiennika [7]

Składnik	Stopień odparowania [%]	
	wymiennik typu SP	wymiennik SPC PS + kalcynator
Cl	96 ± 3	93 ± 3
SO ₃	62 ± 12	40 ± 13
Na ₂ O	32 ± 11	24 ± 7
K ₂ O	61 ± 8	42 ± 8

SP – *suspension preheater*.

W piecu alkalia łączą się głównie z siarką, tworząc siarczany $3K_2SO_4 \cdot Na_2SO_4$ oraz przy znacznym wzroście siarki – $CaSO_4$. Ponieważ związki alkaliów z siarką charakteryzują się niską odparowalnością, w związku z czym tylko ich część przechodzi w piecu w stan gazowy, reszta alkaliów opuszcza instalację z klinkierem. Parametrem, który decyduje o zdolności wyprowadzenia alkaliów z klinkierem jest stosunek molowy SO_3 do sumy $Na_2O + K_2O$ wyrażony wzorem:

$$W_{SO_3} = (SO_3/80) : [K_2O/94 + Na_2O/62] \quad (1)$$

Jeżeli $W_{SO_3} > 1$ świadczy to o nadmiarze siarki w stosunku do $Na_2O + K_2O$, czemu sprzyja tworzenie się narostów siarczanowych. Natomiast gdy zawartość siarki w układzie pieca będzie niska $W_{SO_3} < 1$, wówczas mamy do czynienia ze wzrostem w instalacji piecowej koncentracji alkaliów, wynikiem czego jest powstawanie narostów alkalicznych. W praktyce, ze względu na wcześniej omawiane warunki do tworzenia zamkniętego obiegu składników lotnych, w piecu występują zarówno narosty siarczanowe (stosunkowo łatwe do usuwania), jak i alkaliczne.

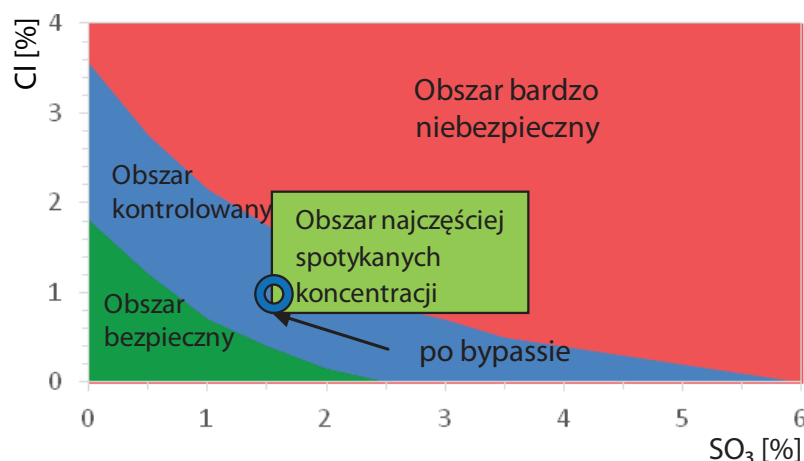
Szczególnie duży wpływ na obieg wewnętrzny składników lotnych ma chlor i jego związki z alkaliami – chlorki. Alkalia w postaci chlorków są bardzo lotne – praktycznie ponad 96% odparowuje w gorącej części pieca. Wysoka lotność chloru i niskie temperatury topnienia jego związków z alkaliami powodują, że chlorki stanowią główną część wewnętrznego obiegu związków lotnych w instalacji piecowej, które w temperaturze poniżej 1100 K przechodzą w fazę ciekłą, co powoduje powstawanie groźnych dla eksploatacji pieców narostów.

Wzrost zawartości chloru wprowadzonego do procesu wypalania, jaki obserwuje się szczególnie w ostatnich latach, który jest wynikiem wzrostu udziału paliw alternatywnych, powoduje, że chlorki są główną przyczyną zakłóceń – narostów w procesie wypalania. Znaczący wpływ chloru na powstanie niebezpiecznych koncentracji składników lotnych spowodował, że we wzorze określającym zdolność wyprowadzenia alkaliów z klinkierem (tzw. module siarczanowym) uwzględniono jego udział. Wartość nowego modułu można wyznaczyć z zależności:

$$W_{SO_3} = (SO_3/80) : [K_2O/94 + Na_2O/62 - 2(CI/35,5)] \quad (2)$$

Utrzymywanie tego modułu na poziomie 0,83–1,00 zabezpiecza teoretycznie proces przed możliwością narastania napieków i wynikających z tego problemów technologicznych [2].

Z doświadczeń krajowych i zagranicznych wynika, że warunkiem bezpiecznej, ciągłej pracy pieca jest utrzymywanie chloru w nadawie piecowej poniżej 0,02%. Innym wskaźnikiem, który pozwala określić tendencje do tworzenia niebezpiecznych narostów jest udział chloru i siarki w procesie [3]. Zależność tę przedstawiono na rycinie 1.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne na podstawie [3].

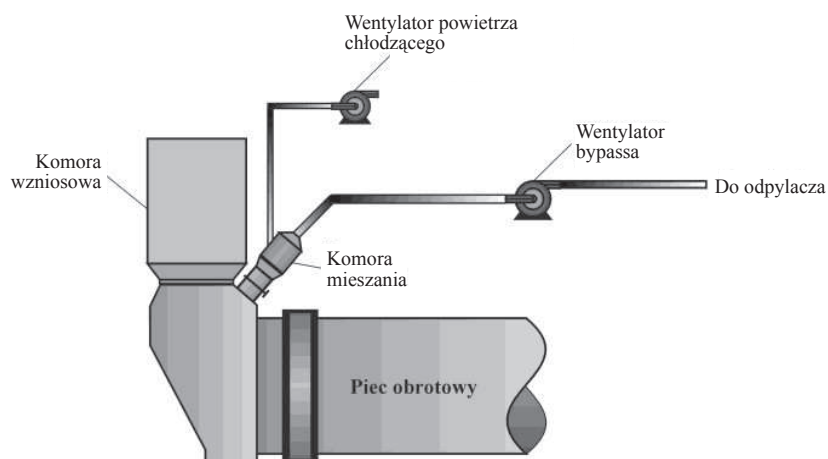
Ryc.1. Tendencje powstawania narostów w zależności od zawartości chloru i siarki

Na tzw. trójkącie: chlor-siarka (zawartość Cl i SO_3 w gorącej mące na wlocie do pieca) wydzielono 3 obszary o różnej skłonności do tworzenia narostów w instalacji piecowej [3–4]. Obszar ograniczony zawartością chloru ($\text{Cl} < 1,3\%$) i siarki ($\text{SO}_3 < 2,5\%$) charakteryzuje się bezpieczną eksploatacją pieca bez skłonności do tworzenia narostów. Obszar o zawartości $\text{Cl} < 3,5\%$ i $\text{SO}_3 < 5,2\%$ charakteryzuje się już tendencją powstawania narostów, które jednak można środkami technologicznymi eliminować. Ostatni obszar ograniczony zawartościami $\text{Cl} > 3,5\%$ i $\text{SO}_3 > 5,2\%$ jest narażony na zarastanie instalacji trudne do opanowania, zagrażające zablokowaniem przepływu gazów i materiału w piecu. Ze względu na wysoką $> 95\%$ lotność związków chloru trudno jest utrzymać jego zawartość na wlocie pieca na poziomie poniżej 1,3, jest to wartość technologicznie trudna do utrzymania. Jedynym rozwiązaniem jest rozwarcie – otwarcie wewnętrznego obiegu składników lotnych, który polega na wyprowadzeniu części składników lotnych z instalacji poza piec za pomocą bypassa, którego celem jest utrzymywanie Cl na poziomie poniżej 1,3% i SO_3 poniżej 2%.

2. Rozwój instalacji bypassa

Najskuteczniejszym sposobem zapobiegania powstawaniu narostów jest bocznicowanie gazów (tzw. bypass gazowy), które polega na wyprowadzeniu, w zależności od technologii wypalania i zawartości składników lotnych w nadawie i paliwie, części gazów (5–20%) poza piec, z pominięciem wymiennika ciepła. Zapyłone gazy o temperaturze ok. 1300 K zostają następnie szybko schłodzone zimnym powietrzem z otoczenia do temperatury ok. 673 K. Intensywność schłodzenia gazów ma na celu wyeliminowanie zagrożenia powstania narostów w komorze mieszania. W procesie schłodzenia gazów bypassowych składniki lotne

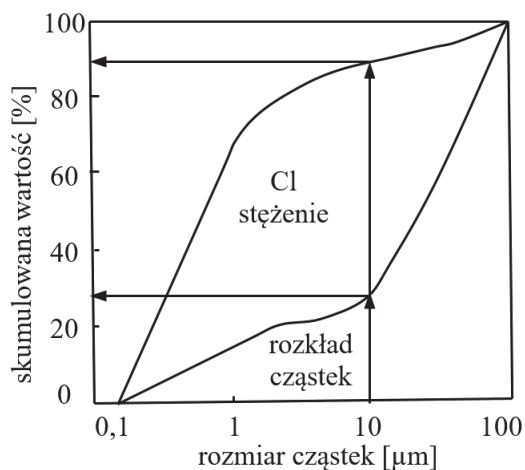
ulegają kondensacji na ziarnach materiału znajdującego się w gazach i w oddzielnym urządzeniu odpylającym zostają odseparowane z gazów i wyprowadzone z pyłem z instalacji pieca. Uzyskuje się w ten sposób zmniejszenie obiegu alkaliów i chloru w piecu oraz zmniejszenie zawartości alkaliów w klinkierze. Schemat typowego bypassa gazowego przedstawiono na rycinie 2.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 2. Instalacja bypassa gazowego

W starszych, mniej sprawnych instalacjach piecowych, dzięki wysokiemu wskaźnikowi zużycia mąki surowcowej (niska sprawność cyklonów), który był skutkiem znacznego unosu pyłów w gazach odlotowych – zawierających skondensowane na nich składniki lotne – występuje często tzw. naturalny bypass materiałowy. Wychwycone w urządzeniu odpylającym pyły zawracane są do pieca, natomiast najdrobniejsza frakcja – emisja pyłowa z urządzenia odpylającego – zawierająca najwięcej składników lotnych jest wystarczającym upustem tych składników poza proces. Na rycinie 3 przedstawiono zawartość skondensowanych na pyłach składników lotnych w zależności od granulacji pyłów.

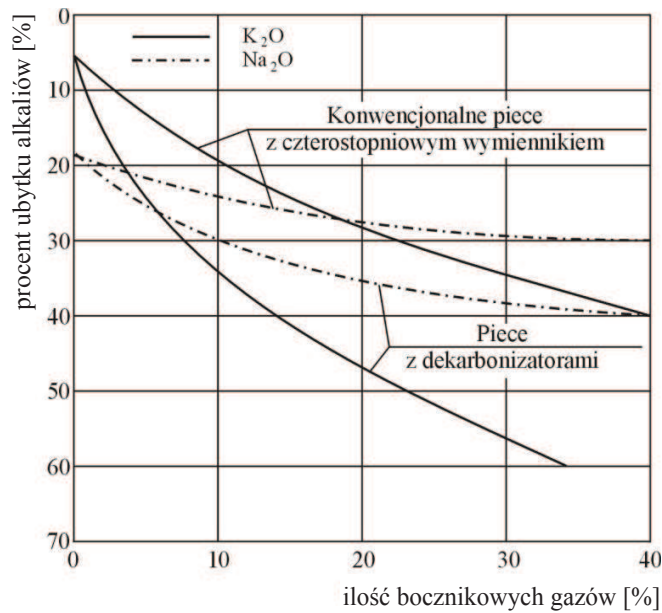


Ryc. 3. Zawartość chloru w pyłach bypassowych w zależności od granulacji pyłów [4]

Z przedstawionych danych wynika, że pyły najdrobniejsze o granulacji $< 10 \mu\text{m}$ zawierają ponad 80% chloru, głównego składnika wpływającego na powstawanie niebezpiecznych narostów w instalacji piecowej. W skrajnych przypadkach (wysokich koncentracji składników lotnych na wlocie do pieca) pyły po urządzeniu odpylającym można nie zawracać do procesu, tylko skierować do zbiornika homogenizacyjnego lub okresowo wyprowadzić poza instalację piecową, np. do przemiału cementu.

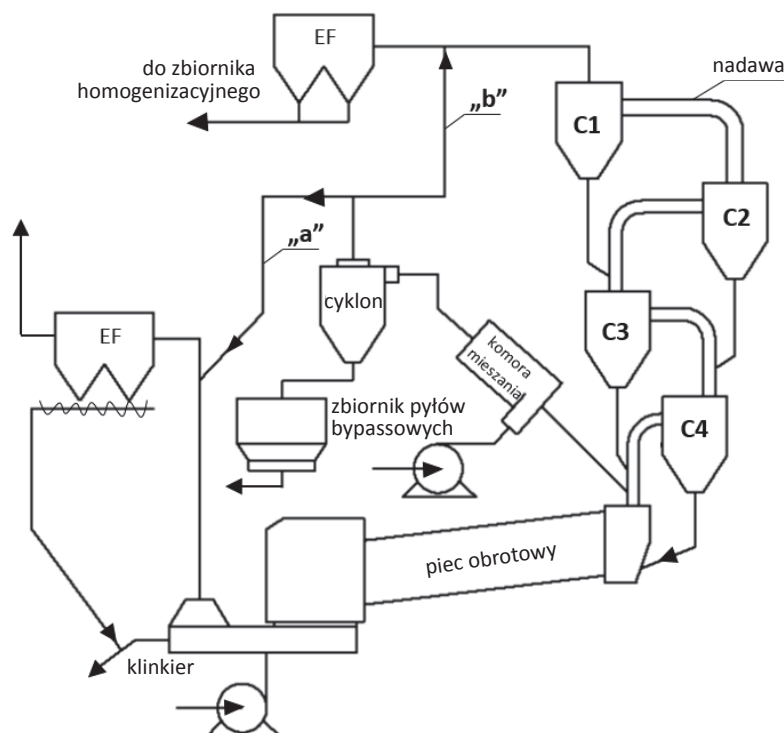
W nowych wysokosprawnych technikach wypalania wyposażonych w nowoczesne urządzenia odpylające (unos poniżej 10 mg/nm^3), wykorzystujących paliwa alternatywne, wymagany jest już bypass gazowy, który jest szczególnie przydatny do ograniczenia obiegu chloru w procesie wypalania klinkieru. Jak wynika z danych dotyczących efektywności bypassa chlorowego, ponad 90% skuteczność uzyskuje się już przy bypassie o wielkości 5% wyprowadzonych gazów. Skuteczność bypassa zależy w dużym stopniu od koncentracji składników lotnych w gazach na wylocie z pieca (w miejscu poboru gazów bypassowych) oraz rozwiązania technicznego instalacji, a zwłaszcza sposobu odpylenia tych gazów. W związku z tym, w celu ograniczenia wielkości bypassa (strat cieplnych) i uzyskania wysokiej sprawności tej instalacji, należy w pierwszej kolejności zadbać o wysoką koncentrację składników lotnych w gazach na wylocie z pieca, ograniczając współczynnik nadmiaru powietrza w piecu do minimum zabezpieczającego spalanie zupełne.

Większość zmodernizowanych w kraju pieców wykorzystujących paliwa alternatywne w procesie dekarbonizacji (dodatkowy palnik w komorze wzniosowej) pracuje w tzw. układzie AT (*air through* – powietrze przez piec). Powoduje to, że na wylocie gazów z pieca występuje znaczny nadmiar powietrza ($\text{O}_2 > 6\%$), który zabezpiecza spalanie zupełne paliwa dozowanego do dekarbonizatora wstępnego. W wyniku tego występuje rozrzedzenie – obniżenie koncentracji składników lotnych w gazach bypassowych. Uzyskanie w takim układzie żądanego efektu bypassa będzie wymagało zwiększenia ilości wyprowadzonych z procesu gazów, co spowoduje wzrost strat cieplnych i zwiększenie ilości kłopotliwych do zagospodarowania pyłów bypassowych. Warunkiem wyeliminowania tego problemu jest zastosowanie w miejsce istniejącego systemu AT układu z trzecim powietrzem z chłodnika – system AS (*air separate*), który polega na doprowadzeniu powietrza do spalania paliwa w dekarbonizatorze oddzielnym przewodem z pominięciem pieca. System AS oprócz poprawy sprawności bypassa (wzrost koncentracji składników) pozwoli na zwiększenie wykorzystania paliw w drugim palniku [4]. Na rycinie 4 przedstawiono wpływ technologii wypalania (koncentracji składników lotnych w gazach na wylocie z pieca) i wielkości bypassa na redukcję alkaliów w układzie.



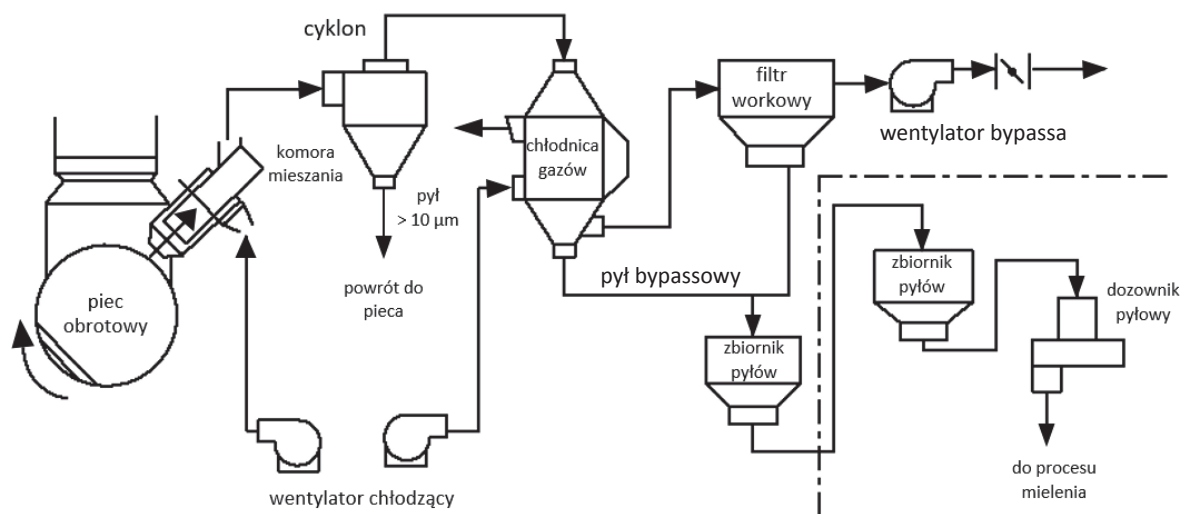
Ryc. 4. Wpływ technologii wypalania i wielkości bocznikowanych gazów na skuteczność obniżenia alkaliów w instalacji piecowej [5]

Wzrost wykorzystania paliw alternatywnych i wynikająca z tego konieczność bypassa gazowego powoduje, że poszukuje się stale nowych rozwiązań, które pozwolą ograniczyć straty ciepłne oraz ilość pyłów bypassowych [6–7]. Na rys. 5 przedstawiono najczęściej stosowane rozwiązania bypassa gazowego. Na wylocie z pieca – z komory wzniosowej – część gazów wylotowych wraz z pyłami o temperaturze ok. 1300 K zasysana zostaje do komory mieszania, gdzie za pomocą powietrza z otoczenia ulega szybkiemu schłodzeniu (do temperatury 500–650 K), co powoduje, że na tych pyłach kondensują znajdujące się tam związki lotne.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.
Ryc. 5. Schemat technologiczny instalacji bypassa gazowego

Następnie w cyklonie odpylającym z gazów tych odseparowane zostają pyły bypassowe, które w zależności od zastosowanego rozwiązania zwracane są do procesu lub zbiornika – magazynu pyłów. Natomiast wstępnie oczyszczone w cyklonie gazy skierowane są do wysokosprawnego odpylacza elektrostatycznego lub tkaninowego. Ponieważ instalacje bypassowe dobudowywane są najczęściej do pracujących już układów piecowych, w związku z czym wykorzystuje się do tego – ze względu na koszty i brak miejsca do postawienia nowego odpylacza – istniejące odpylacze pracujące w instalacji pieca. Najczęściej wykorzystuje się istniejący odpylacz powietrza nadmiarowego z chłodnika (wersja „a”) lub odpylacz gazów piecowych (wersja „b”). Zaletą wersji „b” jest wykorzystanie entalpii gazów bypassowych w procesie suszenia w młynie surowca (częściowe ograniczenie strat cieplnych). Wadą tego rozwiązania jest zwrot najdrobniejszej frakcji pyłów bypassowych do mąki surowcowej, które zgodnie z ryciną 3 zawierają najwięcej skondensowanych chlorków. Zawrót tych pyłów do nadawy z jednej strony ogranicza ilość pyłów do zagospodarowania, ale z drugiej strony powoduje częściowe zamknięcie obiegu składników lotnych, co skutkuje zmniejszeniem skuteczności instalacji bypassa. Rozwiązaniem, które eliminuje w znacznym stopniu problem pyłów bypassowych jest technika „bezpylowego” bypassa, opracowana przez japońską firmę Taiheiyo Cement Corporation, którą przedstawiono na rycinie 6.



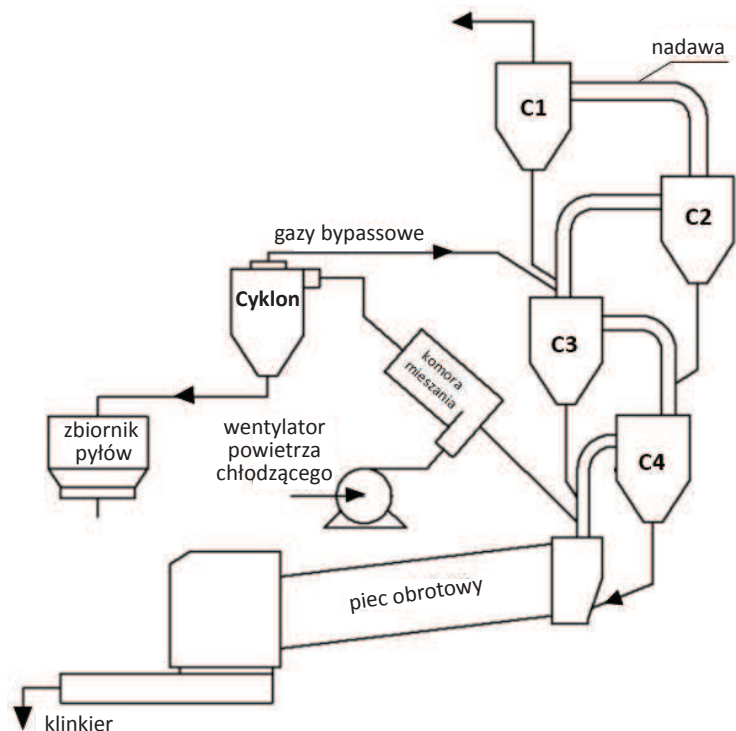
Ryc. 6. Schemat instalacji bypassa chlorowego firmy Taiheiyo Cement Corporation [4]

Zasada tego rozwiązania wykorzystuje zależność przedstawioną na rycinie 3. Polega ona na zwrocie do procesu pyłów bypassowych grubych – $> 10 \mu\text{m}$, które stanowią ok. 70% pyłów w gazach bypassowych, na których kondensuje stosunkowo mało, bo ok. 10% związków chloru. Do wydzielenia tych pyłów z gazów bypassowych wykorzystuje się mechaniczny odpylacz – cyklon, który praktycznie nie odseparowuje pyłów poniżej $10 \mu\text{m}$. Natomiast najdrobniejsza

frakcja, zawarta w gazach po cyklonie, po wtórnym schłodzeniu w chłodnicy gazów, odseparowana jest w wysokosprawnym odpylaczu tkaninowym. Wytrącone najdrobniejsze pyły, zawierające ok. 90% skondensowanych chlorków wyprowadzone zostają poza układ piecowy do zbiornika pyłów bypassowych, z którego następnie wykorzystane są w cemencie. Jak wynika z danych literaturowych, rozwiązanie takie zabezpiecza uzyskiwanie wymaganego ograniczenia chloru w gorącej mące na wlocie pieca i jednocześnie minimalizuje ilość kłopotliwych pyłów bypassowych, które bez problemu można zagospodarować w cemencie. Wadą tego rozwiązania jest jednak strata ciepła, wynosząca dla 5% bypassa ponad 120 kJ/kgkl.

3. Koncepcja nowej – bez strat ciepłych – techniki bypassa gazowego

Wysokie straty ciepłe wynikające z wyprowadzenia z procesu części gazów bypassowych powodują, że poszukuje się metod ich ograniczenia. Najprostszy sposób, polegający na minimalizacji ilości gazów bypassowych, nie jest często wystarczającym rozwiązaniem, ponieważ o wielkości bypassa decyduje zawartość składników lotnych w surowcu i paliwie. W związku z tym poszukuje się innych metod ograniczenia strat ciepłych. Przykładem takiego rozwiązania jest instalacja bypassa przedstawiona na rycinie 7, wykonana przez firmę MBM [8].



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 7. Schemat instalacji bypassa ze zwrotem gazów do procesu

Zaletą tego rozwiązania jest jego niski koszt i prostota wykonania. Dyskusyjny jest natomiast problem ograniczenia strat cieplnych polegający na zwrocie gazów bypassowych o temperaturze ok. 600 K do procesu oraz skuteczności tego bypassa. Różnica w stosunku do typowej instalacji bypassa polega na tym, że gazy po schłodzeniu w komorze schładzającej i odpyleniu w cyklonie, zwracane są do procesu – przewodu łączącego drugi (2C) i trzeci (3C) stopień cyklonowego wymiennika ciepła. Natomiast odseparowane w cyklonie bypassa pyły wyprowadzone są z układu piecowego i gromadzone w zbiorniku. Jak wynika z danych eksploatacyjnych pieców wyposażonych w tego typu instalacje bypassa (w kraju cementownie Warta i Odra), sprawność tej instalacji jest niska i nie eliminuje problemu zarastania wymiennika. Wynika to ze sprawności odpylacza mechanicznego – cyklonu, dla którego dolną granicą odseparowania są cząstki powyżej 10 μm . W związku z tym w gazach po cyklonie znajdują się praktycznie wszystkie najdrobniejsze cząstki ($< 10 \mu\text{m}$), które zawierają ok. 90% skondensowanych chlorków.

Zawrót tych gazów do procesu – wymiennika ciepła – powoduje, że obieg składników lotnych tylko częściowo zostaje rozarty, w związku z czym jego skuteczność jest bardzo niska i nie rozwiązuje problemu. Aby uzyskać wymagane obniżenie chloru na wlocie do pieca ($< 1,3\%$), tego typu bypass musi być znacznie większy ($> 5\%$) od tradycyjnego bypassa z upustem gazów poza piec. Wzrost ilości gazów bypassowych w takim rozwiązaniu powoduje duże problemy eksploatacyjne pieca. Zwiększenie ilości gazów bypassowych, oprócz wzrostu ilości pyłów wyprowadzonych z procesu, powoduje znaczny przyrost gazów w wymienniku ciepła – spowodowany wymaganą ilością powietrza do schłodzenia i skondensowania składników lotnych – co może spowodować zakłócenia w pracy ostatnich stopni wymiennika ciepła (wysoki unos) lub wręcz obniżenie wydajności pieca.

Ze względu na trudne warunki pracy wentylatora piecowego – ilość i zapyłone gazy o wysokiej temperaturze (ok. 600 – 650 K) – jego parametry (spręż ΔP i wydajność \dot{V}) mają zazwyczaj mały zakres rezerw, w związku z czym każdy wzrost ilości gazów i wynikający z tego wzrost oporów hydraulicznych spowoduje ograniczenie wydajności wentylatora piecowego, wynikiem czego będzie obniżenie wydajności pieca. Problematiczny jest również zakładany efekt energetyczny takiego bypassa. Schłodzone gazy bypassowe o temperaturze ok. 550–700 K wprowadzone do przewodu pomiędzy C2 i C3, w którym panuje wyższa temperatura gazów (ok. 900 K), spowoduje pogorszenie pracy wymiennika i gorsze przygotowanie materiału na wlocie pieca, wynikiem czego będzie dodatkowy wzrost zużycia ciepła. W ocenie tego rozwiązania przedstawiono tylko jego najistotniejsze wady, które w niektórych projektach zostały już częściowo wyeliminowane. Polegają one na zastąpieniu odpylacza cyklonowego wysokotemperaturowym elektrofiltrem (EF). Gazy po EF zwracane są, podobnie jak w instalacji z cyklonem, do przewodu

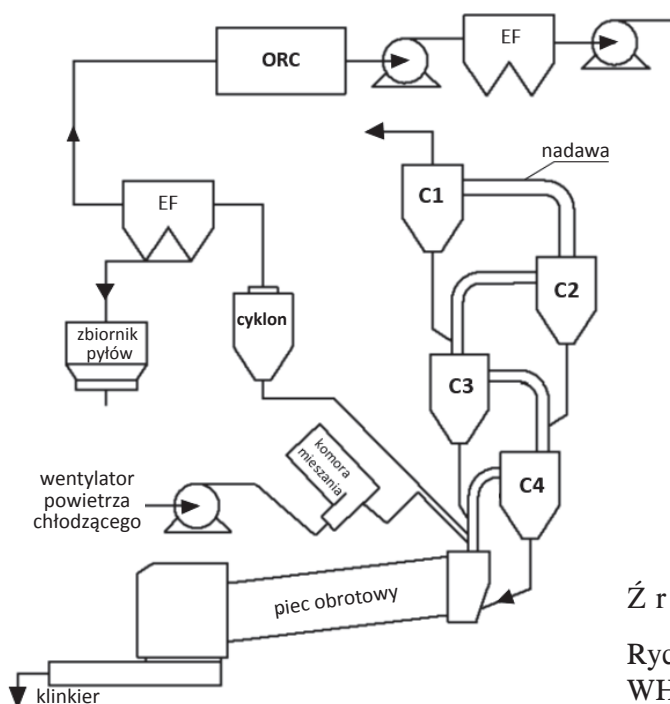
łączącego cyklony 2C i 3C wymiennika, natomiast pył z EF wyprowadzony jest całkowicie z układu piecowego do zbiornika magazynowego.

Skuteczność tego bypassa obniża zwrot gazów po EF do wymiennika, co powoduje wtórny obieg związków chloru znajdujących się w najdrobniejszej frakcji – unosie z elektrofiltra. Prostem rozwiązaniem jest tutaj zrezygnowanie ze zwrotu gazów po EF do wymiennika i skierowanie ich do atmosfery (nowy emitör) lub np. do elektrofiltra piecowego. Wadą tego rozwiązania jest wysoka ilość pyłów bypassowych – odpad surowcowy trudny do zagospodarowania w takiej ilości. Problem ten można zminimalizować, wprowadzając dwustopniowe odpylenie gazów bypassowych, podobnie jak na rycinie 6. Gazy po schłodzeniu w komorze mieszania odpylone są wstępnie w cyklonie, a dopiero najdrobniejsza frakcja w wysokosprawnym elektrofiltrze lub odpylaczu tkaninowym. Wytrącone w cyklonie pyły – grube $> 10 \mu\text{m}$ cząstki – zawierające poniżej 10% skondensowanych chlorków, zwracane są bezpośrednio do procesu. Natomiast najdrobniejsze frakcje (ok. 30% pyłów bypassowych) odseparowane w EF, wyprowadzone są poza proces do zbiornika magazynowego. Takie rozwiązanie zabezpiecza już ciągłą, bezpieczną pracę pieca. Minusem tego rozwiązania, podobnie jak przedstawionego na rycinach 5 i 6, jest strata ciepła bypassa.

W oparciu o własne doświadczenia oraz dane literaturowe opracowano koncepcję nowej instalacji bypassa, która pośrednio pozwala na wyeliminowanie strat ciepłych bypassa. Zasadniczym celem tego rozwiązania jest wykorzystanie ciepła gazów bypassowych poza piecem i młynem surowca w instalacji WHR (*Waste Heat Recovery* – odzysku ciepła odpadowego). Jest to obecnie bardzo popularne rozwiązanie, stosowane m.in. do wykorzystania entalpii gazów od-

lotowych z pieca lub powietrza nadmiarowego z chłodników klinkieru [9].

Na rycinie 8 przedstawiono schemat nowej techniki bypassa gazowego, która skutecznie ogranicza obieg składników lotnych w procesie, zwłaszcza związki chloru oraz pozwala zminimalizować straty ciepłe związane z upustem gorących gazów i likwiduje problem zagospodarowania pyłów bypassowych.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 8. Schemat instalacji bypassa z układem WHR (*Waste Heat Recovery*)

W zależności od wydajności pieca, przy 5% bypasse entalpia gazów bypaso- wych po komorze mieszania wynosi ok. 2,5–6,0 MW. Ze względu na stosunko- wo niską temperaturę tych gazów (ok. 600 K) rozwiązaniem układu WHR może być instalacja ORC lub cykl Kaliny. W zależności od zastosowanego rozwiąza- nia można będzie, wykorzystując entalpie tych gazów, wyprodukować energię elektryczną o mocy 280–850 kW (w oparciu o ORC) lub stosując cykl Kaliny 340–1000 kW. Zarówno w jednym, jak i drugim rozwiązaniu wyprodukowa- na energia elektryczna nie tylko pokryje zapotrzebowanie mocy wynikającej z napędów urządzeń instalacji bypassa, ale również części napędów instalacji piecowej. Przedstawiony sposób wykorzystania entalpii gazów bypassa jest bar- dzo elastyczny. Poprzez dodatkowe wykorzystanie entalpii gazów odlotowych z pieca lub powietrza nadmiarowego z chłodnika klinkieru, wielkość mocy ukła- du WHR może być dopasowana do potrzeb zakładu.

Zaletą układu WHR – ORC jest stała sprawność przy stosunkowo dużych zmia- nach obciążenia. W związku z czym układ praktycznie nie będzie wrażliwy na zmiany ilości gazów bypaso- wych wynikające z tego procesu.

4. Podsumowanie

W nowoczesnych technikach wypalania klinkieru, w których wykorzystuje się w znacznej części paliwa alternatywne z odpadów, występuje zagrożenie po- wstawania narostów będących wynikiem zamkniętego obiegu składników lot- nych: chloru, siarki i alkaliów. W związku z tym jedynym skutecznym spo- sobem wyeliminowania powstawania narostów jest rozwarcie obiegu składni- ków lotnych za pomocą bypassa gazowego. Praktycznie wszystkie dotychczas stosowane techniki bypassa gazowego charakteryzują się stratami cieplnymi. Dotychczasowe metody ograniczenia strat cieplnych bypassa były mało skutecz- ne i powodowały często tworzenie wtórnego obiegu zamkniętego składników lotnych. Problem ten został wyeliminowany w przedstawionym wyżej sposobie, polegającym na wykorzystaniu entalpii gazów bypaso- wych w instalacji WHR. Duża elastyczność takiego rozwiązania i możliwość skojarzenia z innymi źródła- mi ciepła odpadowego z procesu wypalania stwarza znaczne możliwości dopaso- wania mocy układu WHR do potrzeb zakładu*.

Literatura

- [1] D u d a J., *Energooszczędne i proekologiczne techniki wypalania klinkieru cementowego*, „Prace Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych” 2004, wyd. spec.

* Praca została sfinansowana z funduszu badawczego PWSZ 2017, pt. „Optymalizacja procesów produkcyjnych”.

- [2] Kalinowski W., Janecka L., *Zakłócenia procesu wypalania klinkieru przy zwiększonym udziale paliw alternatywnych*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 2013, nr 15, s. 30–44.
- [3] Robin B., Baker C., *Operating experience with bypass system in Heidelberg-Cement AG's Burglengenfeldcement works*, „Cement International” 2005, No. 5, s. 79–85.
- [4] Sutou K., Harada H., Ueno N., *New chloride bypass system for stable kiln operation and recycling of waste*, „ZKG International” 2001, No. 3, s. 121–127.
- [5] Svendsen J., *Technologia produkcji cementu o małej zawartości alkaliów z surowców bogatych w te składniki, przy małym zużyciu energii*, „Cement, Wapno, Gips” 1979, nr 5, s. 181–184.
- [6] Federhen S., *Innovations in kiln gas bypass system*, [w:] *Verfahrenstechnik der Zementherstellung, VDZ Congress Düsseldorf 2009*, s. 208–212,
- [7] Schoffmann H., *Gas-Bypass-Anlagen zur Beherrschung von Chlorid-Kreislaufen im Zementwerk*, materiały Lafarge CTEC, Wien.
- [8] Maury H.D., Pavenstedt R.G., *Chlor-Bypass zur Erhöhung des Brennstoffeinsatzes aus Müll beim Klinkerbrennen*, „Zement, Kalk, Gips” 1988, Nr. 11, s. 540–542.
- [9] Tomasiak J., Duda J., *Poprawa efektywności energetycznej procesów technologicznych poprzez zastosowanie układu ORC*, [w:] *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, red. R. Knosala, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2016, s. 514–523.

JERZY DUDA
MARIUSZ KOŁOSOWSKI
JACEK TOMASIAK

METHODS OF LIMITING THERMAL BYPASS LOSSES

Keywords: rotary furnace, bypass, heat consumption, ORC.

The development of new, dry methods of clinker production in furnaces with multistage raw material heaters has resulted in new technological problems related to accretions building up in the heat exchangers. Such accretions form because of the circulation of volatile components: alkali, sulphur and chlorine. Beside raw material and coal dust, a lot of volatile components come from alternative fuels. Recent years have seen a significant increase in the use of alternative fuels in the clinker burning process, which made it necessary to restrict the circulation of volatile components in the furnace system with a bypass, which depending on volatile component volume lets 3–20% of gases out of the furnace, bypassing the heat exchanger. Each percent of bypassed gases increases heat consumption in the burning process by approx. 20–25 kJ/kg clinker. As a result, the tendency is to limit the size of the bypass. Ecological and economic effects of using alternative fuels makes their production usage grow constantly. This, in turn, results in increased volatile component circulation and the ensuing need to increase the volume of bypassed gases. The article presents one of the ways to reduce thermal losses resulting from operation of a bypass system, involving the use of enthalpy of bypass gases to produce electricity.