XXIII konferencja naukowo-techniczna
szczecin-międzyzdroje, 23-26 maja 2007
awarie budowlane 2007
zapobieganie diagnostyka naprawy rekonstrukcje

Dr hab. inż. Maria FIERTAK, prof. PK, mfiertak@imikb.wil.pk.edu.pl
Politechnika Krakowska
Inż. Stanisław KAŃKA, skanka@imikb.wil.pk.edu.pl
Politechnika Krakowska
Mgr inż. Mariusz KĘDZIERSKI, biuro@emka.krakow.pl
EMKA Usługi Specjalistyczne

PRZYCZYNY I SKUTKI POSTĘPUJĄCEJ DESTRUKCJI BETONU W TRZONACH KOMINÓW PRZEMYSŁOWYCH

THE CAUSES AND EFFECTS OF ADVANCING CONCRETE DESTRUCTION IN THE TRUNKS OF ENERGETIC CHIMNEYS

Streszczenie W referacie przedstawiono wyniki badań postępu destrukcji betonu trzonu komina energetycznego na podstawie badań i analiz przeprowadzonych w latach 1995-2006. Badania obejmują okres, w którym komin pracował jako typowy tzw. „gorący" oraz po wprowadzeniu IOS, a także po wykonaniu remontu powierzchni zewnętrznej. Stwierdzono, iż mechanizm destrukcji nie uległ zmianie, a istotne przyspieszenie zasięgu skażenia związane jest z wykonaniem naprawy polegającej na uszczelnieniu powierzchni zewnętrznej trzonu komina.

Abstract In this paper there were presented the results of research on the progress of concrete destruction in the trunk of energetic chimney on the basis of research and analysis, which had been carried out from 1995 to 2006. The research include period of time in which the object worked as a typical, so called, „hot" chimney and after introducing sulphur removal installation (SRI) and renovation of the outer surface. It was stated that the mechanism of destruction hadn't changed, and the significant acceleration of contamination range was connected with sealing of the outer surface of the chimney trunk.

1. Wprowadzenie

Wymogi ekologiczne spowodowały, iż w ostatnich latach liczne zakłady elektroenergetyczne wprowadzają instalacje odsiarczania spalin (IOS), co w zasadniczy sposób wpływa na parametry fizyko-chemiczne gazów odprowadzanych dotychczas przez kominy tzw. gorące. Można generalnie biorąc stwierdzić, że bez względu na konkretnie zastosowaną technologię odsiarczania, charakterystyka gazów odlotowych zmienia się w stopniu znaczącym. Ma to istotny wpływ zarówno na parametry ciągu kominowego, jak i na charakter zagrożenia korozyjnego materiałów występujących w kominie. Zagrożenie to zmienia się zwłaszcza wtedy, gdy przez dłuższy czas użytkowane „gorące" kominy zostają zaadaptowane, bez modyfikacji warstw wewnętrznych, do odprowadzania gazów odsiarczonych.

Środowisko pracy kominów energetycznych można więc ze względu na rodzaj odprowadzanych spalin podzielić na:

1° środowisko spalin „suchych"
2° środowisko spalin „mokrych".

Spaliny odprowadzane z kotłów parowych lub wodnych opalanych węglem (spaliny suche) charakteryzują się stosunkowo wysoką temperaturą, przeciętnie powyżej 120°C, maksymalnie do 240°C, niską zawartością wilgoci oraz znaczną zawartością związków siarki. Takie warunki zazwyczaj nie powodują spadku temperatury poniżej punktu rosy, choć wpływają na powolne i systematyczne skażenie betonu związkami siarki.
Wprowadzanie zmian w elektrowniach i elektrociepłowniach polega na budowie Instalacji Odsiarczania Spalin (IOS), zamianie kotłów tradycyjnych na fluidalne oraz coraz powszechniejsze stosowanie tzw. „biopaliw", głównie biomasy w postaci trocin. Każde z tych rozwiązań wpływa korzystnie na środowisko poprzez ograniczenie emisji czynników szkodliwych, a w szczególności obniżenie zawartości siarki w spalinach ($SO_2 \leq 500$ mg/Nm^3). Wiąże się to jednak ze znaczącą zmianą parametrów spalin tj. obniżeniem ich temperatury do 70-110°C przy jednoczesnym wzroście ich wilgotności w granicach 7-12%. W przewodach odprowadzających tego rodzaju spaliny, gazy stale lub okresowo mają temperaturę niższą od punktu rosy, co wpływa na wykraplanie się kondensatu i pomimo niższego stężenia SO_2 powoduje zwiększenie agresywności środowiska w stosunku do tworzyw cementowych.

2. Wpływ sposobu eksploatacji i przeprowadzanych remontów na zróżnicowanie uszkodzeń betonu trzonu kominów

2.1 Nieremontowane kominy odprowadzające spaliny gorące

Główne uszkodzenia i degradacja betonu związane są z wadami wykonawczymi oraz agresją czynników środowiskowych. Do wad wykonawczych należą: raki i niedobetonowania, odkryte pręty zbrojeniowe, szczeliny i pęknięcia w miejscach szwów roboczych uskoki na styku ułożenia płyt szalunkowych. Wady wynikające z oddziaływań środowiskowych to głównie odspojenia betonu związane z korozją zbrojenia, wycieki wzdłuż rys oraz wycieki punktowe (korozja rozpuszczania), ubytki i odspojenia betonu związane z korozją pęcznienia (siarczanową i chlorkową) oraz rysy i pęknięcia pionowe związane z oddziaływaniami termicznymi.
Wieloletnia eksploatacja i zmiany parametrów fizykochemicznych betonu, w szczególności w otulinie zbrojenia mogą powodować w pewnym momencie gwałtowne przyspieszenie destrukcji betonu.

2.2 Kominy po wprowadzeniu IOS

Szczególne uszkodzenia wykazują kominy „mokre" pracujące bez odpowiedniego przystosowania przewodów spalin. Eksploatacja tych konstrukcji powoduje powstawanie:

- intensywnych wycieków wapna wzdłuż rys i szwów roboczych oraz wycieków punktowych w miejscach uszkodzonego betonu
- ługowanie $Ca(OH)_2$ przez rysy i pęknięcia pionowe pochodzenia termicznego
- odspojenia lica betonu wraz z naniesionymi warstwami naprawczymi.

Na obraz destrukcji betonu mają wpływ: zmiana parametrów odprowadzanych gazów (obniżenie temperatury przy wzroście wilgotności), silne skażenie chemiczne przekroju betonowego na wskutek wieloletniej eksploatacji komina odprowadzającego spaliny silnie zasiarczone oraz brak zabezpieczenia wewnętrznej powierzchni trzonu żelbetowego przed przenikaniem wilgoci i gazów.

2.3 Kominy po przeprowadzonym remoncie

Silne uszkodzenia betonu trzonu komina mogą występować również po przeprowadzonym remoncie. Przyczynami ich mogą być: błędnie dobrana technologia warstw naprawczych, wykonanie remontu jedynie od zewnątrz bez eliminacji przyczyn uszkodzeń (brak odpowiedniej izolacji termicznej, co wpływa na powiększające się pęknięcia termiczne, brak ochrony betonu od wnętrza przy agresywnym, mokrym środowisku) lub złe przygotowanie powierzchni i niedbała aplikacja materiałów.

O ile zastosowanie po stronie zewnętrznej nowoczesnych materiałów ochronnych betonu zatrzymuje procesy jego destrukcji pod wpływem czynników atmosferycznych, to wpływa niekorzystnie na pracę cieplo-wilgotnościową trzonu jako przegrody budowlanej. Zatrzymanie wody wewnątrz przekroju znacznie przyspiesza procesy rozkładu spoiwa zapoczątkowane wcześniej. Woda jest środowiskiem w którym szybkość reakcji znacznie wzrasta, co może doprowadzić do całkowitej degradacji materiału w ciągu zaledwie kilku lat.

Poniżej przedstawiono wyniki badań betonu trzonu komina, eksploatowanego przez 20 lat jako typowy komin tzw. „gorący". Następnie w ciąg odprowadzania spalin włączono IOS. Po roku pracy komina w zmienionych warunkach przeprowadzono badania pozwalające stwierdzić, czy i w jakim stopniu zmiany w sposobie odprowadzania spalin wpłynęły na silnie zasiarczony beton.

W 2000 r. wykonano remont powierzchni zewnętrznej polegający na nałożeniu warstw naprawczych i polimerowej powłoki uszczelniającej beton. W 2006 r. zaobserwowano silne zniszczenia polegające na rozwarstwieniu betonu, odpadaniu otuliny i destrukcji głębszych warstw betonu. Uszkodzenia zewnętrznej powierzchni trzonu i ich nasilanie się przedstawiono na rys. 1.

Rys. 1. Uszkodzenia zewnętrznej powierzchni trzonu
(kolorem czerwonym oznaczono nowe i powiększone ubytki w okresie pomiędzy kolejnymi przeglądami)

3. Opis i wyniki badań

Autorzy prowadzili badania betonu pobranego w formie odwiertów przelotowych. Stan betonu oceniono na podstawie następujących badań i oznaczeń:

- odczynu (pH) wyciągu wodnego
- zawartości spoiwa i kruszywa
- zawartości jonów SO_4^{2-} i Cl^-
- gęstości pozornej, nasiąkliwości i wytrzymałości na ściskanie
- badań strukturalnych w mikroskopie skaningowym wyposażonym w analizator rentgenowski.

Rolę poszczególnych oznaczeń i dopuszczone normami ich wartości graniczne omówiono wcześniej w innych publikacjach [1], [2], [3] i [4].

W tablicy 1 przedstawiono porównanie wyników badań uzyskanych kolejno po 20 latach eksploatacji komina bez instalacji IOS, po rocznym okresie odprowadzania spalin odsiarczonych oraz po wykonaniu remontu powierzchni zewnętrznej. Porównanie to dotyczy skrajnych zawartości odczynu (pH), jonów siarczanowych i chlorkowych w betonie. Badano beton warstw zewnętrznych i beton kontaktujący się z materiałem izolacji termicznej.

Wyniki badań przedstawione w tablicy 1 wskazują, iż o ile w ciągu 20 lat pracy komina w warunkach dużego stężenia SO_2 i wysokiej temperatury wystąpiło znaczne skażenie betonu jonami SO_4^{2-} i Cl^-, to w ciągu tylko 1 roku pracy komina z IOS, zwłaszcza minimalne stężenia tych jonów znacznie wzrosły. Po wykonaniu remontu wystąpiło silne odalkalizowanie spoiwa w betonie, które objęło strefę zbrojenia zewnętrznego.

W badaniach strukturalnych potwierdzono opisaną w [3] strefowość destrukcji w poziomym przekroju płaszcza. W betonie (20 lat pracy bez IOS i 12 miesięcy z włączoną instalacją odsiarczania) pobranym w formie rdzeni występowały trzy warstwy różniące się zasięgiem i rodzajem produktów korozji. W warstwie o grubości 3-4 cm od wnętrza komina, beton był silnie zniszczony, z krystalizującym gipsem wtórnym (patrz rys.2). Kolejną warstwą o grubości 1-2 cm stanowił beton, którego spoiwo zawierało znaczne ilości ettringitu (rys.3) oraz zasadowego chlorku wapnia (rys.4). Poza opisanymi warstwami, beton wykazywał prawidłowy odczyn oraz zawartość jonów SO_4^{2-} nie przekraczającą 2,5% masy spoiwa. Nie stwierdzono w nim również obecności jonów Cl^-.

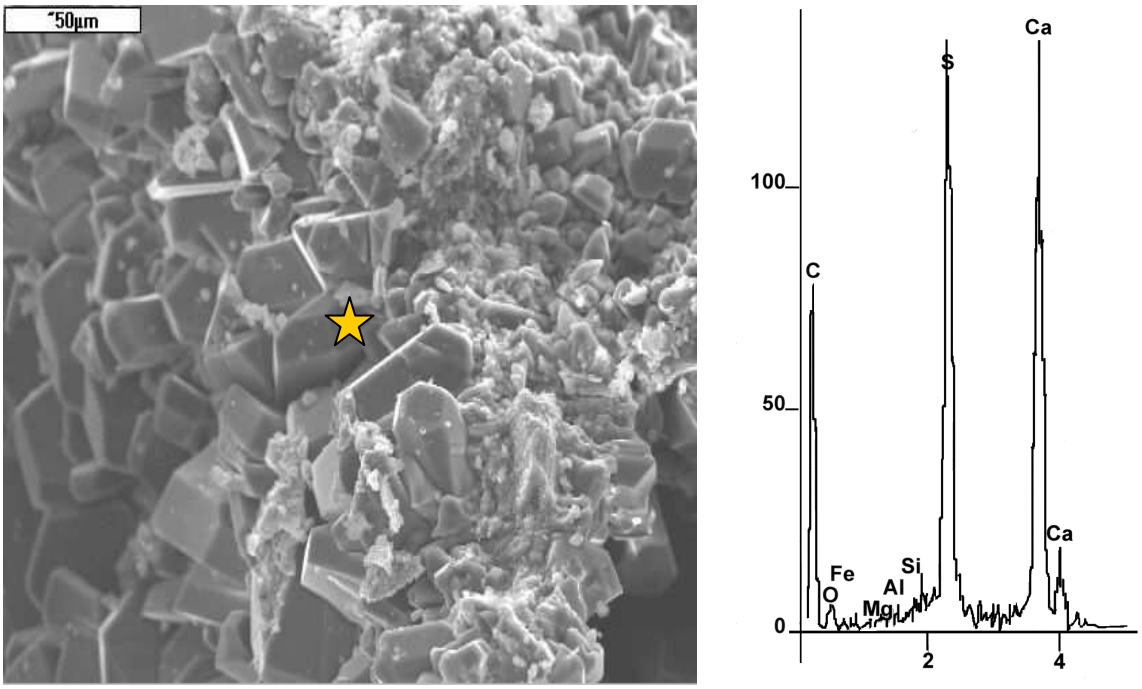
Tablica 1 Zawartości jonów siarczanowych i chlorkowych w betonie trzonu komina

Warunki pracy komina	Wartości skrajne odczynu i oznaczanych jonów [% masy spoiwa]					
	Warstwy zewnętrzne			Warstwy wewnętrzne		
	pH	SO_4^{2-}	Cl^-	pH	SO_4^{2-}	Cl^-
20 lat pracy bez IOS	12,0–11,0	2,5–5,2	0,08–0,30	10,9–10,4	2,5–7,2	0,18–0,50
1 rok pracy z IOS SO_4^{2-}	11,8–10,6	3,5–6,4	0,08–0,40	10,8–8,6	3,5–7,4	0,22–0,72
Po remoncie i uszczelnieniu powierzchni zewnętrznej	10,6–7,8	3,5–6,8	0,08–0,50	9,6–7,8	3,5–8,2	0,28–0,72

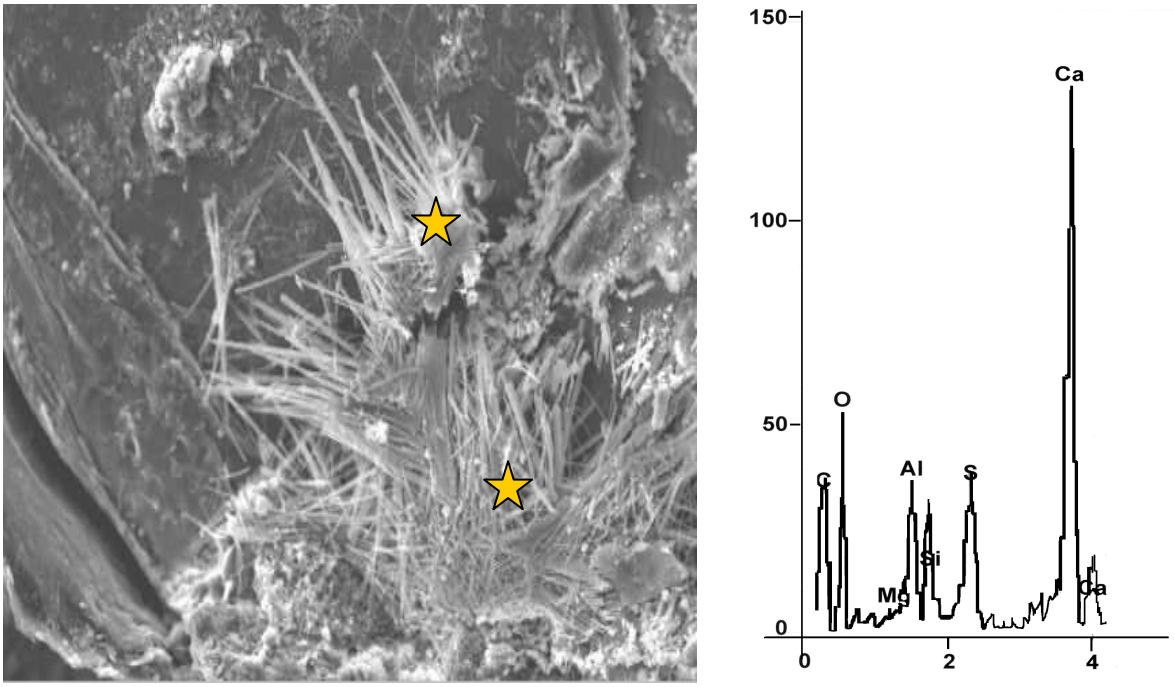
Przyczyny i skutki degradacji betonu trzonu komina po wykonanym remoncie powierzchni zewnętrznej trzonu pozwoliły określić wyniki badań, których analiza wykazała, że:

- beton jest silnie odalkalizowany i rozwarstwiony, wykazuje zarówno w warstwach wewnętrznych jak i zewnętrznych obecność pęczniejącego ettringitu wtórnego

($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), który jest produktem korozji siarczanowej. W betonie tym występuje również zawyżona zawartość jonów chlorkowych związanych w sól Friedela ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$). Jony chlorkowe występują także w warstwie z bezpośredniego kontaktu ze zbrojeniem



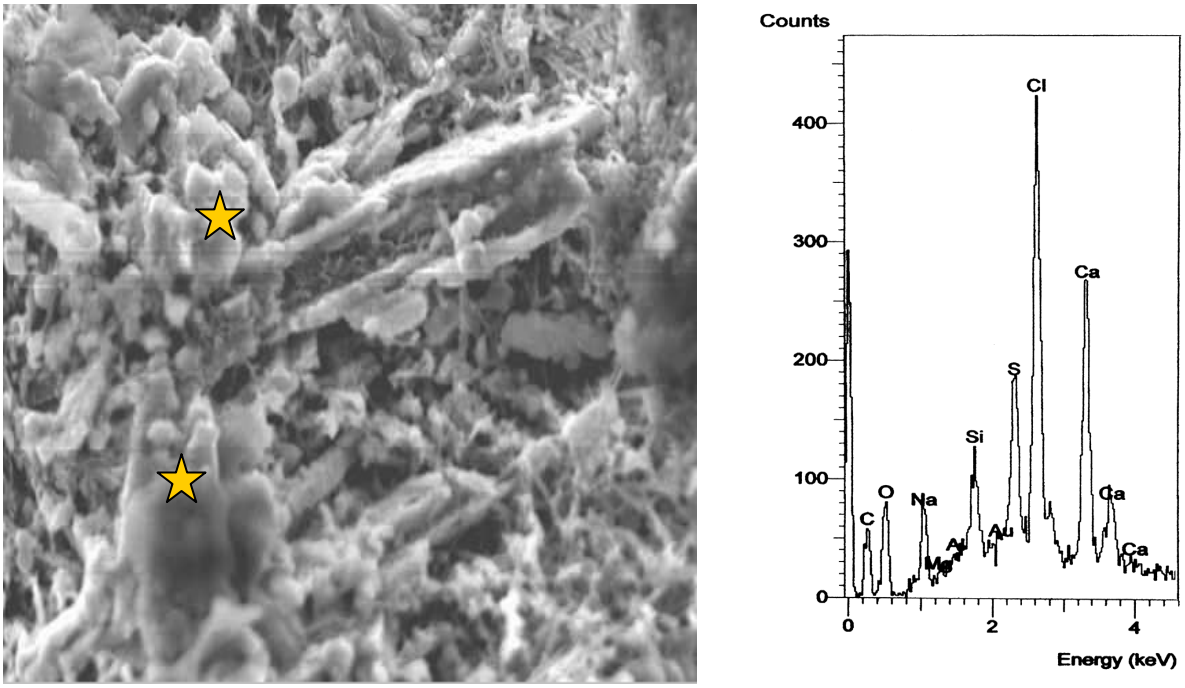
Rys. 2. Gips jako produkt korozji siarczanowej betonu w warstwach wewnętrznych trzonu



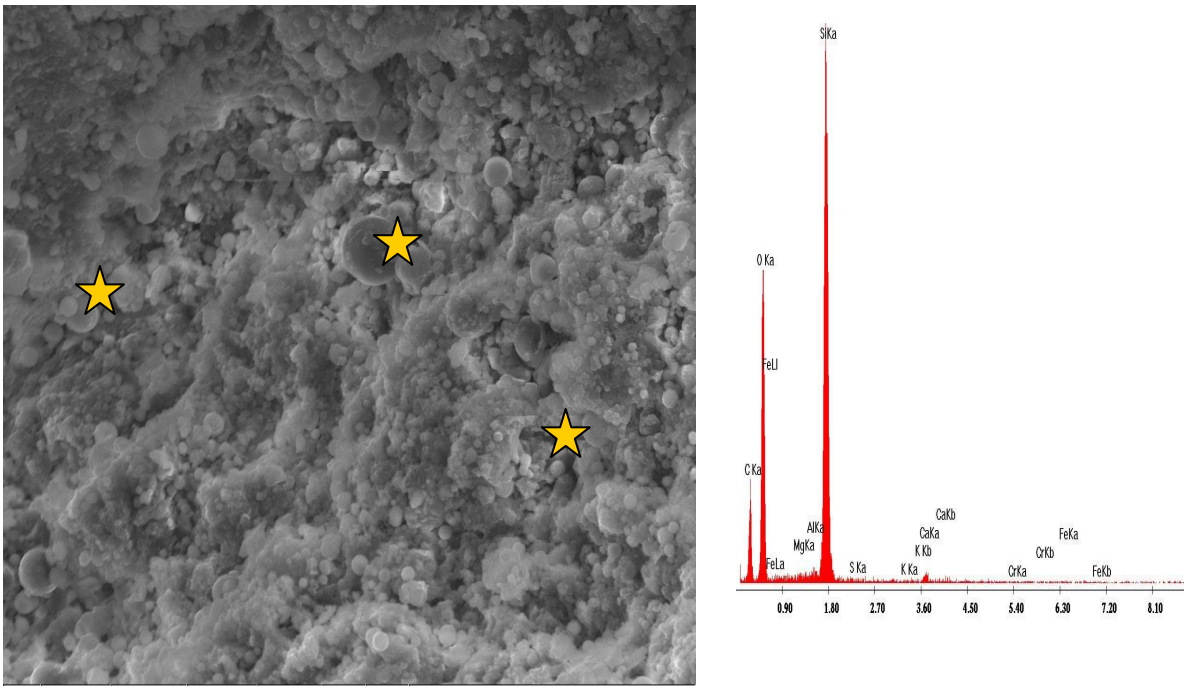
Rys. 3. Ettringit jako produkt korozji siarczanowej betonu wraz z analizą EDS w zaznaczonych punktach

- spoiwo badanych betonów uległo w znacznej mierze rozkładowi, którego głównymi produktami są węglan wapniowy i krzemionka (rys.5 i 6)
- szczególnie intensywny rozkład spoiwa występował pod warstwami naprawczymi w warstwach zewnętrznych betonu

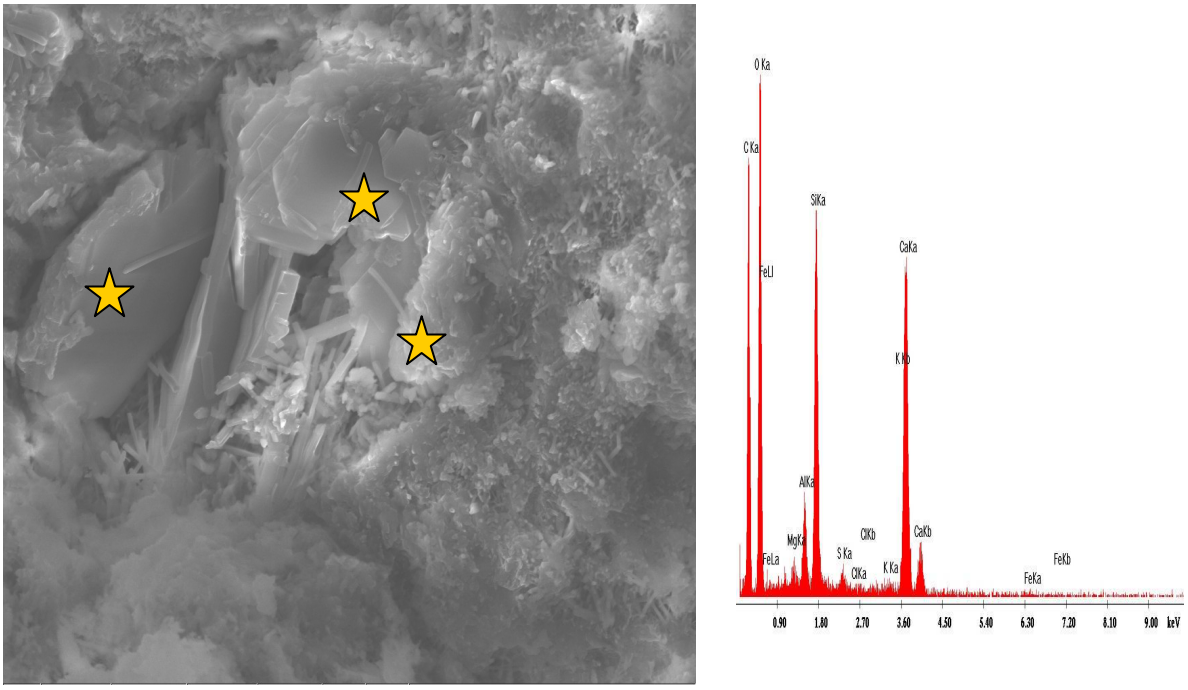
– badany beton nie ma właściwości ochronnych w stosunku do stali zbrojeniowej, co związane jest zarówno ze stymulującym korozję działaniem jonów chlorkowych (korozja wżerowa), jak i rozkładem warstw pasywnych w wyniku silnego odalkalizowania i związanego z tym procesem obniżeniem pH cieczy porowej (patrz rys.7),
– prawidłowy odczyn wyciągu wodnego, oraz zawartość jonów SO_4^{2-} i Cl^- nie przekraczająca wartości dopuszczalnych, charakteryzuje jedynie warstwy środkowe trzonu.



Rys. 4. Sól Friedela ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$). Jony chlorkowe występujące w warstwie z bezpośredniego kontaktu ze zbrojeniem. EDS w punktach zaznaczonych gwiazdkami



Rys. 5. SiO_2 jako produkt rozkładu fazy CSH spoiwa



Rys. 6. Węglan wapniowy i krzemionka - produkty rozpadu spoiwa. EDS w zaznaczonych punktach

Skorodowana stal Skorodowana warstwa betonu przy stali zbrojeniowej

Rys. 7. Korozja stali zbrojeniowej będąca wynikiem odalkalizowania betonu i obecności jonów chlorkowych

Porównaniem objęto także głębokość skażenia betonu ocenianą w oparciu o badanie strukturalne. Głębokość skażenia wyznaczono w mikroskopie skaningowym obserwując zmiany w spoiwie w półcentymetrowych warstwach odciętych z rdzeni, przy czym uznano, iż beton nie jest skażony jeśli w badanej warstwie obserwowano prawidłowy obraz fazy CSH, a sonda Rtg nie wykazywała obecności siarki i chloru. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2 Głębokość skażenia betonu oceniana w badaniach strukturalnych

Warunki pracy komina	Głębokość skażenia betonu oceniana w badaniach strukturalnych		
	Długość odwiertu [cm]	Głębokość skażenia [cm]	% przekroju skażonego jonami SO_4^{2-} i Cl^-
20 lat pracy bez IOS	26,0	6,5	16,9
1 rok pracy z IOS	24,5	6,0	24,5
Po remoncie i uszczelnieniu powierzchni zewnętrznej	25,5	12,3	48,4

Przedstawione w tablicy 2 wyniki badań wskazują, iż w ciągu 20 lat pracy komina bez IOS skażeniu ulegał beton w około 17% przekroju płaszcza, natomiast w ciągu tylko 12 miesięcy z włączoną instalacją odsiarczania skażenie przekroju wzrosło o 10%. Drastycznie, do około 50% zwiększył się przekrój skażonego betonu po wykonaniu remontu powierzchni zewnętrznej trzonu komina.

4. Podsumowanie

Żelbetowe płaszcze kominów energetycznych w toku użytkowania w środowisku suchym zostały skażone związkami siarki ulegającymi przemianie w jony SO_4^{2-}.

W dotychczasowej „suchej” eksploatacji tych konstrukcji nie wystąpiła destrukcja siarczanowa. Zagrożenie taką korozją staje się realne w przypadku konstrukcji, których eksploatacja w związku z włączeniem instalacji odsiarczania spalin staje się „mokra”. Ta modyfikacja odprowadzania spalin zagraża uruchomieniem korozji siarczanowej wywołanej siarczanami już obecnymi w konstrukcji. Korozja ta występuje zarówno po stronie wewnętrznej jak i zewnętrznej trzonu. Wykonanie remontu tylko od zewnątrz, polegającego na doszczelnieniu struktury betonu, powoduje silne jego zawilgocenie ze względu na utrudnione odparowywanie wody, które związane jest z obecnością zewnętrznych powłok ochronnych. Doprowadza to z reguły do rozkładu krzemianów w fazie CSH spoiwa, zniszczenia warstw naprawczych i silnego odalkalizowania betonu w strefie zbrojenia zewnętrznego. Makroskopowym tego objawem są sile zarysowania i rozwarstwienia betonu oraz jego destrukcja (rys.8).

Rys. 8. Obraz zniszczeń komina po remoncie powierzchni zewnętrznej

Literatura

1. Broniewski T., Ciesielski R., Fiertak M.: Ocena stanu technicznego i prognozowanie trwałości żelbetowych kominów przemysłowych, Ochrona przed Korozją, 1/1999, ss. 7-12.
2. Fiertak M., Kańka S.: Charakterystyczne przypadki korozji siarczanowej betonu, X Konferencja Naukowo-Techniczna „Trwałość budowli i ochrona przed korozją” KONTRA’96, Zakopane, maj 1996, ss. 99-106.
3. Fiertak M., Kańka S.: Ocena stopnia destrukcji materiałów w żelbetowych kominach energetycznych, Inżynieria i Budownictwo, nr 7-8/1995, ss. 363-366.
4. Fiertak M., Kańka S.: Zastosowanie badań strukturalnych do oceny zagrożenia konstrukcji betonowych korozją siarczanową, Ochrona przed Korozją, 5/1997, ss. 137-140.