

teczniejszym określonych parametrach  $G_{glob}$ ,  $\tau_{cr}$ ,  $\theta_{cr}$ ,  $\tau_{peak}$ ,  $\theta_{peak}$ ), pozwalających na inżynierską ocenę stanów granicznych konstrukcji bliższych stanom rzeczywistym.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Kwiatek J., Obiekty budowlane na terenach górniczych. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice 2007
- [2] Kubica J., Niezbrojone ściany murowe poddane odkształceniom postaciowym wywołanym nierównomiernymi pionowymi przemieszczeniami podłoża. Zeszyty Politechniki Śląskiej, seria Budownictwo, z. 96, Gliwice 2003
- [3] Lewicki B., Jarmontowicz R., Kubica J., Podstawy projektowania niezbrojonych konstrukcji murowych. Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2001
- [4] Lee J., Fennes G. L., Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. Journal of Engineering Mechanics, vol. 124, No. 8, 1998, p. 892–900
- [5] Lubliner J., Oliver J., Oller S., Onate E., A Plastic-Damage Model for Concrete. Int. Journal of Solids and Structures, vol. 25, 1989, p. 299–329
- [6] Wawrzynek A., Cińcio A., Fedorowicz J., Numerical Verification of the Barcelona Model Adapted for Brick Walls. Proceedings of the 7th International Masonry Conference, 30/31 October – 1 November, London 2006, p. 84
- [7] Fedorowicz J., Zagadnienie kontaktowe budowla – podłoże gruntowe. Część II. Kryteria tworzenia i oceny modeli obliczeniowych układów konstrukcja budowlana – podłoże górnicze. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Budownictwo, nr 1805, z. 114, Gliwice 2008
- [8] Fedorowicz L., Fedorowicz J., Evaluation of the distortion resistance for the wall structure by taking advantage of degradation model. Proceedings of the 7th International Conference on "New Trends in Statics and Dynamics of Buildings". Bratislava, Slovakia, October 22–23 2009, 1922, (full text on CD-ROM)
- [9] PN-B-03002:1999 Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie
- [10] Bartoszek M., Fedorowicz J., Numeryczna analiza pracy ścian murowych z zastosowaniem modelu sprężysto-plastycznego z degradacją. Modelowanie Inżynierskie, tom 6, nr 37, 2009, s. 27–34

#### INFORMACJE O AUTORACH

**Dr hab. inż., prof. nzw. Pol. Śl. Lidia Fedorowicz**, Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli Politechniki Śląskiej, mechanika konstrukcji, zagadnienia kontaktowe konstrukcja – podłoże gruntowe, lidia.fedorowicz@polsl.pl

**Dr hab. inż. Jan Fedorowicz**, Politechnika Śląska, Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, mechanika konstrukcji Politechniki Śląskiej, zagadnienia kontaktowe konstrukcja – podłoże gruntowe, jan.fedorowicz@polsl.pl

# Wpływ skażenia siarczanami na trwałość wykładziny ceramicznej w kominach energetycznych

Dr inż. Teresa Stryszewska, mgr inż. Stanisław Kańka

Celem pracy było opracowanie metody analizy sygnału impact-echo w celu oceny przyczepności warstwy naprawczej do podłoża betonowego. Przeprowadzono badania na dwóch grupach układów naprawczych o różnej jakości zespolenia mierzonej przyczepnością przez odrywanie „pull-off”. Zróżnicowaną przyczepność uzyskano dzięki zastosowaniu różnych metod obróbki powierzchniowej podłoża betonowych. Przygotowane podłoża zostały scharakteryzowane pod względem chropowatości, mikrozarzysowania i przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie. Analiza regresji wielorakiej między przyczepnością a parametrami otrzymanymi z analizy falkowej sygnału impact-echo pozwoliła na zaproponowanie procedury do szacowania przyczepności.

**Słowa kluczowe:** naprawa, adhezja, przyczepność, pull-off, impact-echo, analiza falkowa.

## Bond estimation repair systems in using impact-echo method

The aim of this work was to develop the method of impact-echo signal analysis for bond estimation between concrete substrate and repair layer. Two groups of repair systems of different bond quality were tested by "pull-off" bond strength measurement. Dispersion in bond strength was obtained due to use of different surface preparation method for concrete substrates. The substrates were characterized by surface roughness, microcracking and surface tensile strength measurements. Multiple regression analysis between bond strength and parameters calculated from wavelet analysis of the impact-echo signal allowed for proposing a procedure for bond strength estimation.

**Key words:** repair, adhesion, bond strength, pull-off, impact-echo, wavelet analysis.



## 1. Wprowadzenie

Wymurówki kominów przemysłowych wykonuje się z kształtek ceramicznych układanych na materiałach spoinujących. Stosowane są elementy murowe takie jak: cegła zwykła, cegła kominówka, cegła klinkierowa oraz cegła kwasoodporna [1]. Są to wyroby ceramiczne, które różnią się od siebie przede wszystkim składem fazowym i porowatością, a co za tym idzie odpornością na środowisko jakie panuje we wnętrzu kominu. Wybór odpowiedniego materiału uzależniony jest od warunków ciepłno-wilgotnościowych pracy kominu.

W większości analizowanych przez autorów kominów energetycznych wymurówkę wykonano z cegły ceramicznej pełnej lub cegły kominówki układanej na zaprawie cementowej. Rozwiązanie takie stosowano przy założeniu, że temperatura odprowadzanych, uznawanych za nieagresywne, spalin będzie w zakresie od 150 do 350°C.

W kominach zimnych, w których występuje temperatura poniżej

**Rys. 1.** Schemat przygotowania próbek do badań  
**Fig. 1.** Sample preparation scheme

Etap I	Etap II	Etap III
		
Pobrana z wymurówki, w formie odwiertu próbka ceramiki	Odcięty od strony przepływu spalin plaster odwiertu (widok od czoła odwiertu)	Wyciąg wodny po analizie chemicznej

100°C oraz kominach ciepłych, w których istnieje możliwość tworzenia się agresywnych skroplin, na ogół stosuje się wymurówki z cegły klinkierowej oraz kwasoodpornej. Układa się je na zaprawach kwasoodpornych (z dodatkiem szkła wodnego potasowego) lub kitach krzemianowych. Natomiast w kominach, w których temperatura odprowadzanych spalin przekracza 400°C do wykonania wymurówki stosuje się cegły szamotowe układane na zaprawie szamotowej [2].

Ze względu na charakter gazów odprowadzanych kominami ener-








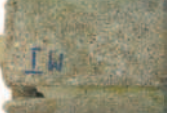
getycznymi, zastosowane materiały są przez cały okres eksploatacji poddawane działaniu agresywnych związków zawartych w tychże spalinach. Zasadniczo w skład gazów agresywnych odprowadzanych kominami zalicza się: dwutlenek siarki (około 7,5%), chlorki lub chlorowodór (około 1,5%), tlenki azotu oraz fluorki lub fluorowodór.

## 2. Oznaczenie stopnia skażenia ceramiki w wymurówce

Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie stopnia skażenia siarczanami wymurówki cera-

**Tabela 1.** Wyniki badań cegły skażonej pobranej z trzonu kominu i cegły nieskażonej

**Table 1.** Test results of contaminated brick taken from chimney shaft and uncontaminated brick

	Cegła zwykła	Cegła kominówka	Cegła klinkierowa	Cegła kwasoodporna
Ceramika nieskażona				
pH wyciągu wodnego	8,3	9,0	9,0	8,4
Zawartość jonów SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [% masy]	0,20	0,16	0,15	0,15
Nasiąkliwość masowa [%]	23,2	11,2	5,3	3,1
Ceramika skażona (pobrana z kominu)				
pH wyciągu wodnego	5,10	5,33	3,87	5,7
Zawartość jonów SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [% masy]	0,7 ÷ 6,9	0,5 ÷ 4,7	0,5 ÷ 2,0	0,5 ÷ 2,5
Nasiąkliwość masowa [%]	14,2	10,2	5,2	2,9

micznej oraz określenie rodzaju produktów korozji i ich wpływu na rozluźnienie struktury badanych materiałów. Dodatkowo określano odczyn badanych próbek. Badaniem objęto cegłę zwykłą, kominówkę, klinkierową i kwasoodporną. Do badań pobierano techniką odwiertów rdzeniowych fragmenty wymurówki z czynnych kominów przemysłowych. Pobrane rdzenie zawierały zarówno ceramikę, jak i materiał spoinujący. Przykładowe rdzenie wraz z wynikami badań przedstawiono w tabeli 1.

Z każdego odwiertu od strony przepływu spalin odcinano plaster ceramiki wraz ze spoiną o grubości około 1 cm (rys. 1). Następnie spoinę oddzielano, a próbkę ceramiki mielono i sporządzano z niej wyciąg wodny, w którym oznacza-

no zawartość jonów siarczanowych oraz odczyn [3, 4].

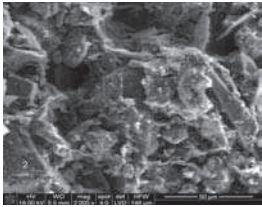
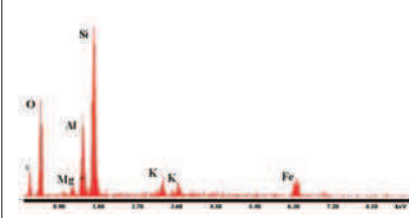
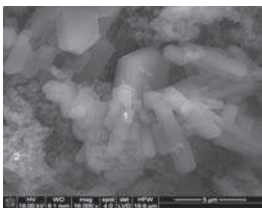
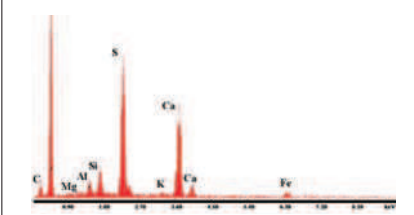
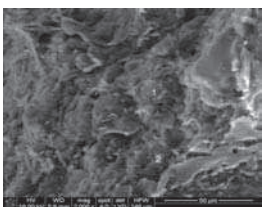
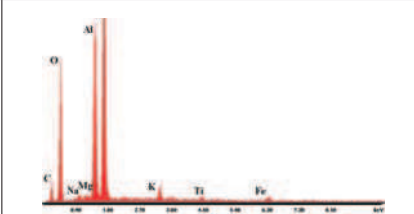
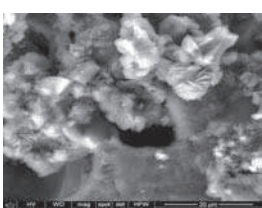
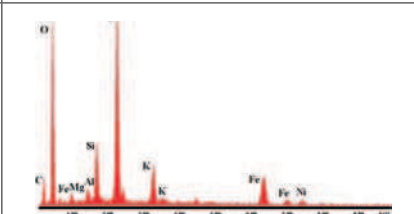
W celach porównawczych, badaniami objęto również cegły nieskażone. W tabeli 1 zamieszczono wyniki badań dotyczące ceramiki skażonej i nieskażonej. W przypadku wyników badań próbek pobranych z kominów, w tabeli zostały podane wartości graniczne, natomiast w przypadku badań ceramiki nieskażonej wyniki stanowią średnią z 3 próbek.

### 3. Oznaczenie produktów korozji metodą mikroskopii skaningowej

Badaniami mikroskopem skaningowym wyposażonym w sondę EDS, objęto próbki cegły zwykłej i kwasoodpornej pobranej z kominów oraz nieeksploatowanej.

**Tabela 2.** Zdjęcia mikrostruktury badanych cegieł skażonych i nieskażonych wraz z analizą EDS

**Table 2.** SEM-EDS analysis of microstructure of uncontaminated and contaminated bricks

	Mikrostruktura cegły zwykłej nieeksploatowanej	
	Mikrostruktura cegły zwykłej pobranej z komina	
	Mikrostruktura cegły kwasoodpornej nieeksploatowanej	
	Mikrostruktura cegły kwasoodpornej pobranej z komina	

W tabeli 2 zamieszczono charakterystyczne zdjęcia mikrostruktury badanych materiałów. Ponadto w wybranych punktach wykonano analizę EDS, umożliwiającą identyfikację powstałych produktów ich korozji.

### 4. Analiza wyników

Uzyskane wyniki badań świadczą o zmianie właściwości początkowych materiałów wchodzących w skład wymurówki kominów odprowadzających gazy spalinowe. Pod wpływem działania gazów następuje spadek pH wszystkich rodzajów badanych cegieł ceramicznych z zasadowego na kwasowe. Spadek wartości odczynu świadczy o powstaniu produktów korozyjnych charakteryzującym się niższym pH. O procesach korozyjnych zachodzących wewnątrz materiału ceramicznego świadczy również podwyższona zawartość jonów siarczanowych w badanych wyciągach wodnych. Ich zawartość względem wartości wyjściowych oznaczonych na ceglach nieeksploatowanych różnego typu jest zwiększona odpowiednio dla cegły zwykłej od 3,5 do 35 razy, dla cegły kominówki od 3 do 30 razy, dla cegły klinkierowej od 3,3 do 13 razy, kwasoodpornej od 3,3 do 16 razy. Uzyskane wyniki potwierdzają zależność pomiędzy porowatością materiału a stopniem skażenia. Materiały o większej porowatości, jak w przypadku cegły zwykłej i kominówki charakteryzują się większym stopniem skażenia, natomiast cegły o mniejszej porowatości, typu klinkierowa i kwasoodporne są w znacznie mniejszym stopniu skażone siarczanami. Na podstawie zdjęć skaningowych i wykonanych analiz EDS w charakterystycznych punktach, można stwierdzić, że produktami korozji siarczanowej w materiałach ceramicznych eksploatowanych w kominach przemysłowych są: siarczanowy wapniowo-żelazowy, potasowy i potasowo-żelazowy oraz gips. Powstałe



**Rys. 2.** Obraz zniszczonej wymurówki ceramicznej w kominach przemysłowych

**Fig. 2.** A picture of destroyed ceramic lining in industrial chimneys

siarczany mają formę struktur krystalicznych. Ze względu na ekspansywny charakter powstających produktów korozji siarczanowej można przypuszczać, że główną przyczyną niszczenia wymurówki ceramicznej jest skażenie jonami siarczanowymi [5].

Na podstawie obserwacji pobranych materiałów i wykonanych analiz chemicznych zauważono, że destrukcja wymurówki, zwłaszcza wykonanej z cegły zwykłej i kominówki zachodzi, gdy zawartość jonów siarczanowych osiąga wartość około 5% jej masy. Degradacja wymurówki ceramicznej objawia się powierzchniowym łuszczeniem kształtek ceramicznych i wykruszaniem materiału spoinującego, co głównie przypisuje się obecności siarczanów.

Przykładowe obrazy zniszczonej wymurówki w kominach przemysłowych pokazano na rysunku 2. Uzyskane wyniki badań próbek pobranych z eksploatowanych kominów przemysłowych nie dają jednoznacznej odpowiedzi dotyczącej granicznych wartości skażenia jonami siarczanowymi cegły klinkierowej i kwasoodpornej, przy których następuje łuszczenie materiału. Wymaga to dalszych badań na próbkach poddanych skażeniu w warunkach laboratoryjnych.

## 5. Podsumowanie

Jednym z głównych powodów przeprowadzania analizy skażenia wykładziny ceramicznej kominów przemysłowych jest konieczność przewidywania skutków odprowadzania spalin, których parametry uległy zmianie na skutek modernizacji procesu spalania np.: w wyniku stosowania biomasy jako paliwa lub wprowadzenia instalacji odsiarczenia spalin. Jak wiadomo zmiany te prowadzą do obniżenia temperatury spalin oraz zwiększenia ich wilgotności. Zatem w nowych warunkach komin może pracować poniżej punktu rosy. Pociąga to za sobą niebezpieczeństwo zapoczątkowania i szybkiego postępu destrukcji wykładziny ceramicznej skażonej siarczanami. Zagrożenie to znacznie się zwiększa, gdy przez dłuższy okres czasu, komin używany zgodnie z pierwotnym, przyjętym w etapie projektowania przeznaczeniem, zaczyna pracować w nowych warunkach, bez modyfikacji warstw wewnętrznych. Nagromadzone w materiałach siarczany w przypadku zawilgocenia, powodują korozję siarczanową wykładziny ceramicznej łącznie z materiałem spoinującym. Ponadto dyfundujące przez zniszczoną wykładzinę wilgotne lub mocno kwaśne składniki gazów spalinowych stwarzają zagrożenia dla trzonu komina.

Wobec tego, niejednokrotnie zachodzi konieczność wpro-

wienia we wnętrzu komina zmian konstrukcyjnych, które polegają na zastosowaniu odpowiednich powłok ochronnych w celu zabezpieczenia wymurówki, zamianie wymurówki z cegły ceramicznej zwykłej na cegłę kwasoodporną ułożoną na kwasoodpornych kitach lub na wprowadzeniu do wnętrza trzonu przewodu ze stali kwasoodpornej. Wybór konkretnego rozwiązania w dużej mierze zależy od stopnia skażenia wykładziny ceramicznej. Zatem niezbędne jest wyznaczenie wartości skażenia siarczanami, przy którym następuje destrukcja omawianych materiałów.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-B-03004:1988 Kominny murowane i żelbetowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [2] Meller M., Pożoga T., Wybrane zagadnienia korozji i utrzymania kominów przemysłowych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2003
- [3] Broniewski T., Fiertak M., Badania stanu technicznego materiałów w kominach energetycznych przeznaczonych do odprowadzania odsiarczonych spalin. Sesja naukowa z okazji 70-lecia urodzin Profesora Romana Ciesielskiego. Politechnika Krakowska Monografia 1995
- [4] Fiertak M., Kańka S., Inżynieria i Budownictwo, nr 7-8, 1995, s. 363-366
- [5] Fiertak M., Kańka S., Proceedings of the 5th International Conference Concrete and concrete structures. Zilina October 2009, s. 91-98

## INFORMACJE O AUTORACH

**Dr inż. Teresa Stryszewska**, Politechnika Krakowska, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli, e-mail: teresastryszewska@gmail.com  
**Mgr inż. Stanisław Kańka**, Politechnika Krakowska, Laboratorium Badawcze Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, e-mail: skanka@imikb.wil.pk.edu.pl

**Adres do korespondencji:** dr inż. Teresa Stryszewska, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków.