

mi w rurach PCV. W wykonanym wykopie za przechyloną ścianą stwierdzono przełamanie ściany nad fundamentem, objawiające się wyraźnym poziomym pęknięciem (rys. 6a). Na odcinku pęknięcia zaobserwowano rdzawe wycieki produktów korozji zbrojenia nośnego ściany (rys. 6b).

Na podstawie badań materiałowych i sprawdzających obliczeń stwierdzono, że przyczyną przełamania nad fundamentem była niewystarczająca nośność ściany na zginanie przy obciążeniu parciem gruntu, co najpierw doprowadziło do zarysowania, a następnie wystąpienia korozji nośnego pionowego zbrojenia na długości powstałej rysy. W badaniach wyciętych próbek rdzeniowych uzyskano średnią wytrzymałość betonu na ściskanie równą 21,0 MPa, co pozwala zakwalifikować

beton w konstrukcji co najwyżej do klasy C12/15.

Ze względu na niewystarczającą nośność ścian oraz uszkodzenia korozyjne niezbędne było wzmocnienie konstrukcji, które zaproponowano przez dobetonowanie od wewnątrz niecki nowych zbrojonych ścian i dna z betonu klasy C30/37.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule przykłady stanów awaryjnych żelbetowych niecek basenowych spowodowanych korozją wskazują, że stosowanie w tych konstrukcjach betonów wyższych klas jest, ze względu na trwałość, w pełni uzasadnione. Eksploatowane nadal obiekty sprzed 30–40 lat, wykonywane wówczas z betonów klas C12/15 ÷ C16/20, są na ogół

w złym stanie technicznym i wymagają obecnie napraw i wzmocnień.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-B-03264: 2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone
- [2] PN-EN 206-1 Beton – Część 1: Wymagania, wykonywanie, produkcja i zgodność
- [3] PN-88/B-01807. Antykorozyjne zabezpieczenia w budownictwie. Konstrukcje betonowe i żelbetowe. Zasady diagnostyki konstrukcji

### INFORMACJE O AUTORZE

**Dr inż. Zbigniew Pająk**, absolwent i pracownik naukowo-dydaktyczny Politechniki Śląskiej, rzeczoznawca budowlany, członek Sekcji Betonu KILiW PAN, autor licznych publikacji i opracowań dotyczących stanu zachowania, awarii, napraw i wzmocnień żelbetowych konstrukcji, e-mail: zbigniew.pajak@polsl.pl

**Adres do korespondencji:** Dr inż. Zbigniew Pająk, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44–100 Gliwice.

# Wymagania parametryczne w analizach uwzględniających degradację materiału ścinanych konstrukcji murowych

Dr hab. inż. Lidia Fedorowicz, dr hab. inż. Jan Fedorowicz

Przedstawione w artykule analizy numeryczne dotyczą elementów konstrukcji murowych narażonych na znaczące, istotne w ocenie stanów granicznych, pionowe przemieszczenia podłoża gruntowego. Stwierdzono, że właściwa realizacja warunków brzegowych w badaniach laboratoryjnych (odpowiedź naprężeniowa otrzymywana na brzegach elementu ścinanego powinna być bliska przewidywanego stanu rzeczywistego w konstrukcji) umożliwiłaby otrzymywanie adekwatnych charakterystyk ścinania wyrażonych odpowiednimi parametrami  $G_{glob}$ ,  $\tau_{cr}$ ,  $\theta_{cr}$ ,  $\tau_{peak}$ ,  $\theta_{peak}$ .

**Słowa kluczowe:** analizy numeryczne, model Barcelona, ścinane elementy murowe.

## Parametrical requirements for analyses allowing for material degradation of the sheared masonry structures

Analyses depicted in this paper focus on behaviour of the masonry structure elements put in a risk of vertical displacement of subsoil, which is important for limit state evaluation. It was found that proper realization of the boundary conditions during laboratory tests (stress-response on boundaries of the sheared element should be sufficiently near to the real state expected in the structure) would let us receive the adequate shear-characteristics, with parameters  $G_{glob}$ ,  $\tau_{cr}$ ,  $\theta_{cr}$ ,  $\tau_{peak}$ ,  $\theta_{peak}$ .

**Key words:** numerical analyses, Barcelona model, sheared masonry elements.

## 1. Wprowadzenie

Klasyczne schematy obliczeniowe ustrojów nośnych budynków tworzone są zgodnie z pewnymi założeniami uznawanymi za dopuszczalne dla przeprowadzenia wiarygodnej, bezpiecznej analizy konstrukcji. Wprowadzane założenia dotyczą głównie geometrii zadania, wytrzymałości materiałów oraz przyjmowanych oddziaływań, zarówno bezpośrednich (czyli obciążeń), jak i wynikających z przemieszczeń konstrukcji – narzuconych więzami lub dodatkowych, będących skutkiem np. ruchów podłoża gruntowego. Współczesne, zaawansowane modele obliczeniowe pozwalające na ograniczenie szeregu założeń upraszczających pracę konstrukcji wymagają w zamian opisu zachowania materiału w złożonych zazwyczaj stanach naprężenia i odkształcenia. Wymagania te stoją jednak nieraz w sprzeczności ze standardem i ustaloną procedurą badań laboratoryjnych.

Przedstawione dalej analizy wskazują na potrzebę działań mieszanych – wspomaganie laboratoryjnie uzyskiwanego opisu zachowania materiału konstrukcyjnego przez „podgląd” pracy tego materiału w konstrukcji, dokonywany w numerycznym modelu obliczeniowym o odpowiednio zaawansowanych związkach konstytutywnych. Służyłoby to właściwemu skorelowaniu charakterystycznych parametrów materiałowych funkcji ścinania ( $G_{glob}$ ,  $\tau_{cr}$ ,  $\tau_{peak}$ ) z rzeczy-

wistym stanem deformacji konstrukcji, wyrażanym parametrami odkształcenia postaciowego ( $\theta_{cr}$ ,  $\theta_{peak}$ ), rys. 2.

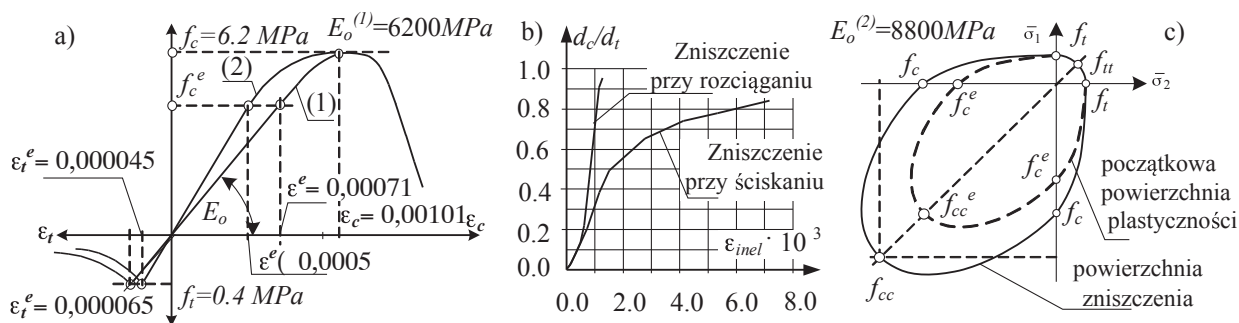
Przeprowadzone analizy dotyczyły elementów konstrukcji murowych narażonych na istotne – w ocenie stanów granicznych – pionowe przemieszczenia podłoża gruntowego. W zagadnieniach dotyczących zachowania konstrukcji murowej podlegającej nierównomiernym przemieszczeniom pionowym podłoża górniczego, ważną rolę w ocenie stanów granicznych użyteczności [1] odgrywa moduł ścinania  $G$ , którego wyznaczenie może przebiegać zgodnie z propozycjami przedstawionymi w [2, 3]. Zastosowany w pracy model konstytutywny Barcelona, sprężysto-plastyczny z degradacją materiału [4, 5], został poddany weryfikacji (m.in. [6]) i kalibracji w odniesieniu do zagadnień kontaktowych budowla – deformujące się podłoża górnicze [7, 8].

## 2. Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe muru w analizach numerycznych

W analizach konstrukcji murowych obowiązują generalnie zasady mechaniki budowli [3]. Rezultaty obliczeń statycznych mają zatem odniesienie do relacji wynikających ze związków konstytutywnych sprężystości. Charakterystyczne w konstrukcjach murowych jest to, że można uzyskać zbliżoną wytrzymałość stosując słabą zaprawę i jednostki murowe o dużej wytrzy-

małości, lub średnie wytrzymałości zarówno dla zaprawy, jak i jednostek murowych. Dla obu przypadków moduły sprężystości mogą się jednak znacznie różnić. Dopiero analiza w modelu obliczeniowym stosującym opis konstytutywny zachowania materiału wychodzący poza zakres pracy sprężystej pozwala na skorelowanie sztywności początkowej – malejącej wraz z degradacją obciążanego materiału – z zależnościami naprężenie – odkształcenie. Rysunek 1 daje skondensowany opis zastosowanego dwumechanizmowego modelu e-p-d [4, 5], przedstawiając kolejno: rys. 1a – przyjęte do analiz charakterystyki ściskania i rozciągania (z zaznaczonymi granicami sprężystości oraz wartościami wytrzymałości materiału w stanach jednoosiowego ściskania i rozciągania), rys. 1b – funkcje degradacji  $d_c$  i  $d_t$  (odpowiadające zniszczeniu przy ściskaniu i rozciąganiu) określane względem niesprężystej części odkształceń, oraz rys. 1c – charakterystyczne powierzchnie modelu (plastyczności i zniszczenia) w układzie naprężeń głównych dla płaskiego stanu naprężenia.

Przedstawiona w [9] propozycja oceny modułu Kirchoffa wywodzi się z laboratoryjnej oceny charakterystyk  $\tau - \Delta/L$  zachowania muru ścinanego (prostopadle do spoin wspornych, przez realizację różnicy przemieszczeń pionowych  $\Delta$  brzołów badanego elementu o rozpiętości  $L$  [2]). Zgodnie z [7, 10] badania ścinania muru mogą być przedmiotem zadowalających symulacji



Rys. 1. a, b) Prawo wzmocnienia i degradacji, c) charakterystyczne powierzchnie modelu e-p-d

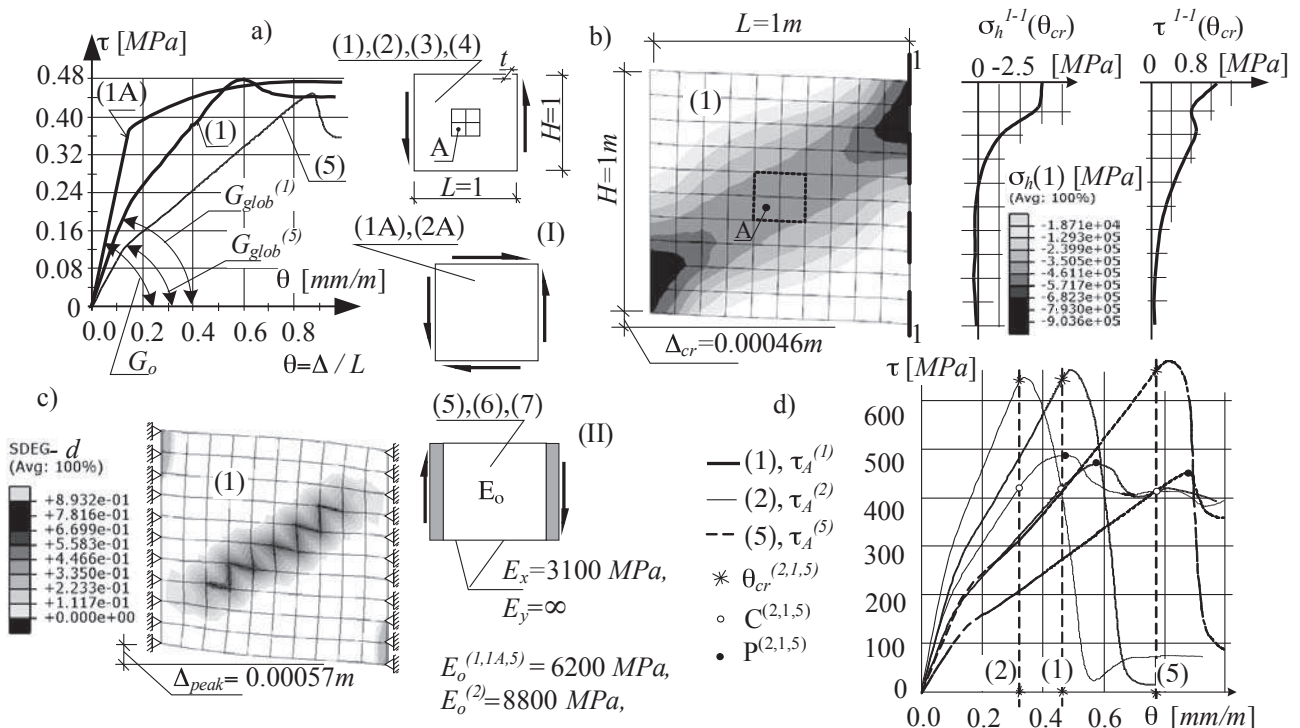
Fig. 1. a, b) Model e-p-d, law of strain hardening and degradation, c) yield surface and surface of failure

numerycznych w modelu e-p-d. Wprowadzone w przedstawianych analizach uproszczenie, rys. 2, dotyczące bezpośredniej realizacji ścinania przez przyrostowe wymuszanie przemieszczeń założonych więzów podporowych, pozwala łatwo śledzić wpływ sztywności brzegów lub sztywności otoczenia ścinanego obszaru na powstawanie zarysowań (degradacji) w strefach brzegowych oraz wynikające stąd zmiany w charakterystykach  $\tau - \Delta/L$ . Zarysowania w strefach brzegowo-podporowych, niemożliwe do uniknięcia zarówno w realizacjach laboratoryjnych, jak i numerycznych [2, 7], mają znaczący wpływ na rozkład naprężeń  $\{\sigma_h, \tau\}$  będących odpowiedzią otoczenia na realizowany przyrostowo proces ścinania (rys. 2b). Istotne jest to, że naprężenia te nie odpowiadają stanom w rzeczywistych konstrukcjach ścianowych poddanych deformacjom postaciowym, jest to zatem problem wymagający szerszego potraktowania. Łatwo można zauważyć, że otrzymywany laboratoryjnie lub

w symulacji numerycznej początkowy moduł  $G$  (określany z części sprężystej charakterystyk ścinania) zależy wyraźnie od warunków brzegowych elementu poddanego badaniu. Poniżej rozróżniono dwa przypadki określania funkcji ścinania  $\tau - \Delta/L$  (lub  $\tau - \theta$ ), gdzie  $\tau$  – jest średnim naprężeniem ścinającym określanym na brzegach badanego elementu jako  $\tau = T^{sred}/H \cdot t$ ,  $\theta = \Delta/L$  – reprezentuje natomiast odkształcenie postaciowe ścinanego elementu murowego. Przypadek I zawiera dwa sposoby otrzymywania funkcji  $\tau - \Delta/L$  w symulacji numerycznej, jako wynik:

- ścinania „skrępowanego” – test 1, przeprowadzony w modelu e-p-d zgodnie z [2, 9], oraz
- tzw. czystego ścinania – test 1A, w modelu e-p-d – rysunek 2a. Przypadek II jest próbą oceny wpływu otoczenia badanego obszaru na postać funkcji  $\tau - \Delta/L$  – test 5 – rysunek 2a, d. Charakterystyczne punkty symulowanych funkcji  $\tau - \Delta/L$  to punkty krytycznych wartości odkształcenia i naprężenia ( $\theta_{cr}, \tau_{cr}$ )

towarzyszącego powstawaniu zarysowań (degradacji materiału) w zaznaczonym obszarze środkowym ścinanego elementu, oraz punkty pikowej wartości wytrzymałości materiału na ścinanie ( $\theta_{peak}, \tau_{peak}$ ). Określanej w taki sposób wytrzymałości krytycznej lub pikowej można przypisać nazwę wytrzymałości globalnej badanego obszaru; przykładowo punkty  $C^{(i)}$ ,  $P^{(i)}$  na rysunku 2d. Nie musi to być jednak największa wartość naprężenia ścinającego towarzyszącego całemu procesowi deformacji analizowanego obszaru (rys. 2d). Dla wartości globalnej  $\tau_{cr}$  (przykładowo rysunek 2b) otrzymujemy w wewnętrznym podobzdarze (A) lokalną wartość pikową naprężenia  $\tau_A$ , tuż przed spadkiem związanym z postępującą, miejscową degradacją. Zgodność wartości naprężeń ścinających określanych na brzegach obszaru oraz w jego wnętrzu może mieć miejsce jedynie w przypadku bliskim czystego ścinania. Na rysunku 2c przedstawiono przykładowo obraz degradacji materiału towarzyszący



Rys. 2 a, b, c) Numeryczna realizacja skrępowanego i czystego ścinania, b, d) badanie funkcji  $\tau - \Delta/L$

Fig. 2. a, b, c) Numerical realized constrained and pure shearing, b, d)  $\tau - \Delta/L$  investigation

wytrzymałości pikowej ścinanego elementu murowego o charakterystyce (1) z rysunku 2a.

Podsumujmy. Oceniając stan naprężenia i odkształcenia w elemencie poddawany „skrępowanemu” ścinaniu (rys. 2b i 2c) powiemy, że gdy w podobszarze  $A(\sigma_1, \sigma_2)$  pojawia się stan zarysowania (i degradacji materiału), spełnione zostaje równanie początkowej powierzchni plastyczności z rysunku 1c; zatem  $F_p = f(\tau_1, \sigma_2) = 0$ . Równocześnie jednak możemy zapisać  $F_p = f(\tau_{cr})$ . Osiągnięcie wartości  $(\tau_{cr}, \theta_{cr})$  w analizie globalnej obszaru danego materiału oznacza, że w badanym obszarze istnieje pewien podobszar (A), w którym zachodzi degradacja materiału i w podobszarze tym następuje spadek sztywności materiału;  $E_d < E_o$ . Analogicznie następuje spadek wartości modułu ścinania G.

Zgodnie z oznaczeniami wprowadzonymi na rysunku 2 opiszemy zjawisko spadku wartości modułu G ( $G \rightarrow G_d$ ) jak poniżej.

1) W ocenie globalnej związanej z charakterystyką  $\tau - \Delta/L$  – jeżeli w badanym obszarze (lub elemencie konstrukcji) dochodzi do degradacji materiału, to dla obszaru tego zapiszemy  $G_d < G_{glob}$ ,

2) W ocenie lokalnej obniżenie wartości modułu – odniesione do podobszaru (A) – wyrazi się  $G_d^{(A)} \leq G_o$ .

Jeżeli zatem  $G_{glob}$  dąży do modułu  $G_o$  ( $G_{glob} \rightarrow G_o$ ), czyli wartość  $\Delta G$  z rysunku 3 jest odpowiednio mała, to w pewnym podobszarze

(A) badanego większego obszaru konstrukcji zachodzi  $\tau^{(A)} \approx \tau_{cr}^{(globalne)}$ . Poszerzoną analizę powyższego problemu przedstawia rysunek 3, gdzie pokazano wrażliwość modułu G oraz funkcji  $\tau - \Delta/L$  globalnej oceny zachowania elementu murowego poddanego „skrępowanemu” ścinaniu na:

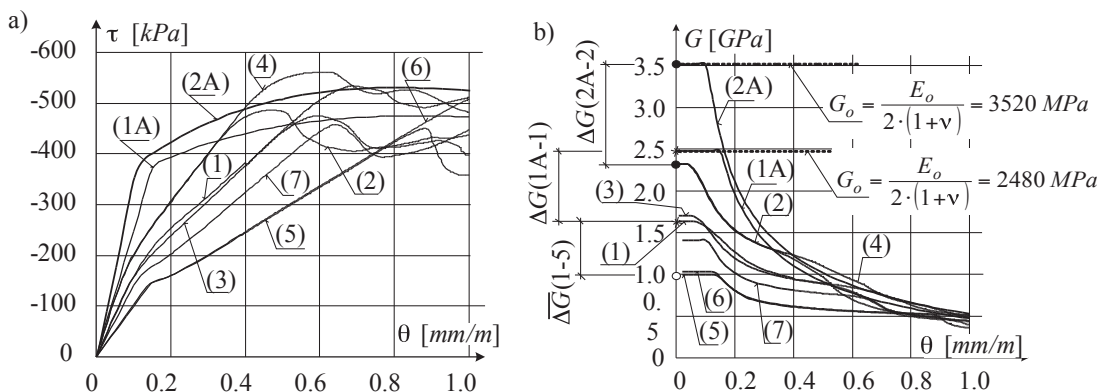
- zmianę sztywności ( $E_o$ ) badanego elementu – testy 1, 2,
  - naprężenia pionowe – testy 3, 4, odpowiednio dla  $E_o = 6.2$  GPa i  $E_o = 8.8$  GPa; przy  $\sigma_v = 100$  kPa,
  - sztywność otoczenia badanego fragmentu konstrukcji – testy 5, 6 dla  $E_o = 6.2$  GPa i odpowiednio  $\sigma_v = 0$  i  $\sigma_v = 100$  kPa, test 7 dla  $E_o = 8.8$  GPa i  $\sigma_v = 0$  kPa;
- Tło powyższych badań tworzą testy czystego ścinania: testy 1A, 2A, odpowiednio dla  $E_o = 6.2$  GPa i  $E_o = 8.8$  GPa.

Różnice w ocenie wartości modułów  $\Delta G = G_o - G_{glob}$  wynikają w sposób oczywisty z realizacji warunków brzegowych i zmiany sztywności własnej elementu, ale także, w sposób znaczący, z uwzględnienia sztywności otoczenia badanego elementu. W badaniach numerycznych nie rejestruje się natomiast, w odróżnieniu od testów laboratoryjnych, zmian wyznaczanego modułu  $G_{glob}$  przy zmianach w wartościach przykładanego naprężenia pionowego  $\sigma_v$ .

### 3. Wnioski

Celem przedstawionych analiz było zwrócenie uwagi na istotny zda-

niem autorów problem. Mianowicie, postępowanie zgodne z propozycją [9] nie jest podejściem uniwersalnym, pozwalającym na określenie modułu Kirchoffa oraz charakterystyk wytrzymałościowo-odkształceniowych konstrukcji murowej poddanej deformacjom postaciowym towarzyszącym ścinaniu dla wszystkich realnych stanów, w których mogą wystąpić różnice pionowych przemieszczeń podłoża, znaczące dla wyężenia konstrukcji. Stanom pracy konstrukcji zginanej na podłożu górniczym oraz konstrukcji poddanej przemieszczeniom podłoża wywołanym zmianą sztywności gruntu towarzyszą różniące się między sobą stany naprężenia – i co istotne – różne od stanu naprężenia w badaniu „skrępowanego” ścinania. Powyższe różnice oraz wrażliwość funkcji  $\tau - \Delta/L$  ( $\tau - \theta$ ) na sztywność otoczenia analizowanego obszaru konstrukcji może tłumaczyć, w pewnym przybliżeniu oczywiście, że przewidywania możliwego zarysowania w deformującej się konstrukcji nie zawsze pokrywają się ze stanem rzeczywistym, pomimo przekroczenia lokalnie warunku dopuszczalnych deformacji postaciowych  $\theta_{critok} \geq \theta_{dop}$ . Określenie zatem sposobu realizacji adekwatnych warunków brzegowych w badaniach laboratoryjnych, tak aby odpowiedź naprężeniowa na wszystkich brzegach elementu poddanego ścinaniu zbliżała się do przewidywanego stanu rzeczywistego, pozwoliłoby na otrzymywanie charakterystyk  $\tau - \Delta/L$  (o sku-



**Rys. 3.**  
 a) Numeryczna realizacja ścinania elementów murowych, b) proces degradacji modułów G  
**Fig. 3.**  
 a) Numerical realized masonry shearing, b) G-moduli degradation process

teczniej 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.