

## WPLYW STREFY PRZEJŚCIOWEJ NA STAN CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWY I NAPRĘŻENIA TYNKU ŚCIANY Z BETONU KOMÓRKOWEGO

Konrad WITCZAK\*, Dariusz GAWIN\*

\* Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: konrad.witczak@p.lodz.pl, gawindar@p.lodz.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wybranych właściwości fizycznych i szerokości Międzyfazowej Strefy Przejściowej na styku tynku cementowego i betonu komórkowego. Wyniki badań zostały wykorzystane podczas symulacji stanu cieplno-wilgotnościowego i naprężeń tynku ściany z betonu komórkowego, o różnej orientacji, poddanej działaniu zmiennych w czasie warunków pogodowych TRM w Warszawie. Symulacje komputerowe, przeprowadzone za pomocą autorskiego programu numerycznego, pokazują, że uwzględnienie w obliczeniach strefy MSP ma istotny wpływ na wyniki i ocenę trwałości tynku zewnętrznego.

**Słowa kluczowe:** Trwałość, symulacje komputerowe, strefa przejściowa, stan cieplno-wilgotnościowy, naprężenia.

### 1. WPROWADZENIE

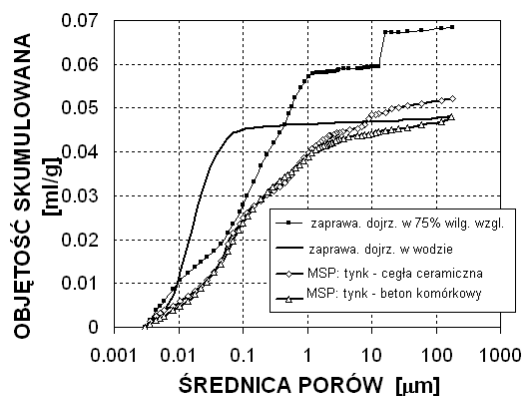
Prognozowanie stanu cieplno-wilgotnościowego elementów obudowy budynku w zmiennych warunkach pogodowych, wykonywane za pomocą zaawansowanych symulacji komputerowych, stało się codzienną praktyką w przodujących biurach projektowych na świecie. Do chwili obecnej opracowano szereg modeli matematycznych zjawisk higro-termicznych oraz bazujących na nich programów komputerowych – ich wyczerpujący przegląd przedstawiono w pracy [1]. Obecnie prowadzone badania poświęcone są głównie problemom trwałości elementów budowlanych, zwłaszcza wykonanych z kompozytów cementowych, oraz prognozowaniu okresu ich bezpiecznej eksploatacji, np. [2-6], uwzględniając także warunki ekstremalne, jak pożar [7], czy zniszczenie mrozowe [8]. Celem niniejszej pracy jest numeryczna analiza naprężeń wywołanych w zewnętrznym tynku cementowym przez zmienny stan cieplno-wilgotnościowy ściany z betonu komórkowego, poddanej działaniu polskich warunków klimatycznych. W tym celu zastosowano model numeryczny zaproponowany przez Gawina i Schreflera [9],

który został uprzednio zweryfikowany eksperymentalnie i zastosowany do rozwiązania szeregu praktycznych problemów Fizyki Budowli, np. [10-12]. Model ten pozwala analizować stan naprężeń i odkształceń materiałów budowlanych przy użyciu tzw. naprężeń efektywnych [13]. W niniejszej pracy model ten został rozszerzony, aby uwzględnić dodatkowo wpływ tzw. ukośnego deszczu (wg [14]) oraz pęknięcie materiału (wg teorii [15]). Wyniki badań laboratoryjnych [16], dotyczących wybranych charakterystyk struktury wewnętrznej betonu komórkowego (BK) i tynku cementowego (TC), ich właściwości cieplnych, wilgotnościowych i wytrzymałościowych oraz odporności mrozowej, jak również międzyfazowej strefy przejściowej między tymi materiałami (MSP), zostały wykorzystane w symulacjach komputerowych. Przeanalizowano wpływ MSP na wyniki obliczeń dotyczących stanu cieplno-wilgotnościowego i naprężeń w tynku zewnętrznym na elewacji, o różnej orientacji względem stron świata, w budynku zlokalizowanym w Warszawie.

### 2. MIĘDZYFAZOWA STREFA PRZEJŚCIOWA BETON KOMÓRKOWY–TYNK CEMENTOWY

W niniejszym rozdziale, ze względu na jego ograniczoną długość, przedstawione zostaną jedynie wybrane wyniki badań struktury wewnętrznej tynku cementowego, dojrzewającego w różnych warunkach wilgotnościowych, wykonanego na podłożu z betonu komórkowego. Grubość warstw, zaobserwowanych w tynku, dojrzewającym w środowisku o wilgotności względnej ok. 75%, zostały określone za pomocą analizy SEM/EDS oraz skaningowej mikroskopii optycznej (SMO). Skład 1m<sup>3</sup> mieszanki, z której został wykonany tynk, był następujący: cement CEM I – 538 kg, woda – 277 kg, piasek – 900 dm<sup>3</sup>.

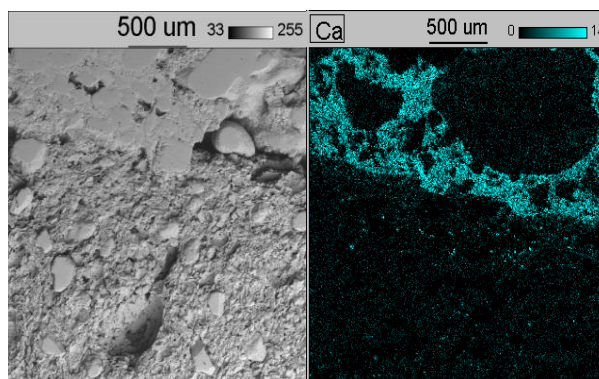
Na rys. 1 pokazano wyniki, wykonanych porozymetrem rtęciowym, badań struktury porowatości tynku cementowego, dojrzewającego w wodzie oraz w powietrzu o wilgotności względnej 75%. Jak widać, tynk dojrzewający w wodzie ma wyraźnie większą objętość drobnych porów (o rozmiarach  $< 10\mu\text{m}$ ) niż tynk w MSP, zarówno na podłożu z cegły ceramicznej, jak i z BK, podczas gdy całkowita porowatość jest zbliżona. Tynk cementowy, dojrzewający w wilgotnym powietrzu, ma większą porowatość niż dojrzewający w wodzie, głównie w zakresie porów o rozmiarze większym niż  $0.4\mu\text{m}$ , podczas gdy objętość porów o rozmiarach  $0.01\text{--}0.1\mu\text{m}$  jest wyraźnie mniejsza. Wyniki te wskazują, że w przypadku tynku cementowego można oczekiwać występowania co najmniej trzech podwarstw o zróżnicowanej strukturze: przypowierzchniowej – o zwiększonej, wskutek wysychania podczas dojrzewania, porowatości, wewnętrznej – o mniejszej porowatości i drobniejszych porach dzięki wystarczającej ilości wody podczas dojrzewania, oraz warstwy MSP – o podobnej porowatości, jak poprzednia warstwa, lecz mniejszej objętości porów drobnych, wskutek niedostatku wody podczas dojrzewania, spowodowanego przez „zasysanie kapilarne” wody z tynku do podłoża.



Rys. 1. Całkowite krzywe rozkładu wielkości porów w zaprawie cementowej dojrzewającej w różnych warunkach wilgotnościowych oraz w tynku cementowym na różnych podłożach.  
Fig. 1. The cumulative pore size distributions of the cement mortar and stuccos matured in different hygral conditions and at different base materials.

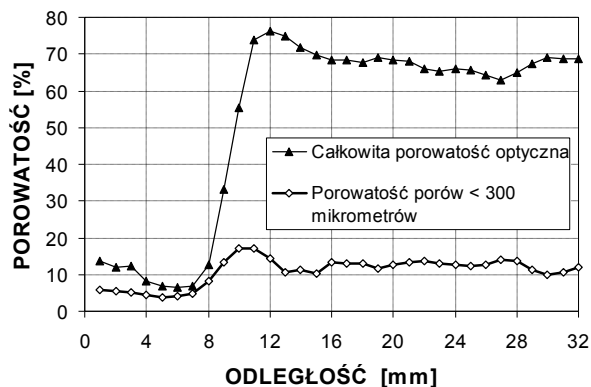
Do oszacowania grubości w/w podwarstw tynku zewnętrznego, wykonanego na analizowanych podłożach, zastosowano różne techniki mikroskopowe. Większość tych prób zakończyła się niepowodzeniem, jak widać na rys. 2, gdzie pokazano wyniki 2-wymiarowej analizy EDS zawartości wapnia w strefie MSP tynk-cegła ceramiczna. Sukcesem zakończyły się natomiast badania wykonane przy użyciu mikroskopii skaningowej, bazujące na normie EN 480–11. Badania wykonano na próbce, wyciętej prostopadle do powierzchni tynku, po zaczernieniu jej spe-

cialną farbą. Odmienne od metody normowej, skanowanie porowatości przeprowadzono co 1 mm wzdłuż linii o długości 90.2 mm, równoległych do styku tynku z pod-



Rys. 2. Obraz strefy MSP tynk/cegła ceramiczna, otrzymany technikami SEM i 2-wymiarowej analizy EDS zawartości Ca.  
Fig. 2. SEM of the cement stucco/ceramic brick interface and EDS 2-D analysis of the calcium content.

łożem. Przykładowe wyniki analizy dla styku tynk cementowy/beton komórkowy pokazano na Rys. 3. Pomimo pewnego rozrzutu i ograniczonej dokładności metody, otrzymane wyniki pokazują wyraźne zróżnicowanie, po grubości próbki, porowatości całkowitej i obejmującej małe pory (tj. o rozmiarach  $< 300\mu\text{m}$ ). Można wyraźnie wyodrębnić 3 podwarstwy, przewidziane już za pomocą porozymetrii rtęciowej, a nawet oszacować ich grubości: ~2 mm strefa przejściowa TC/BK, ~4 mm warstwa wewnętrzna TC oraz ~14 mm przypowierzchniowa warstwa tynku (całkowita grubość tynku na Rys. 3 wynosiła ~20 mm, ale wykonanie skanowania było możliwe dopiero w pewnej odległości od powierzchni tynku). Wymienione grubości warstw zostały założone podczas symulacji, których wyniki przedstawiono w rozdziale 4.



Rys. 3. Wyniki badania porowatości styku tynk cementowy/beton komórkowy, wykonanych metodą SMO (wg. EN 480 - 11)  
Fig. 3. Results of the SOM test of porosity (based on the EN 480 - 11) for the cement stucco/AAC interface.

### 3. MODEL MATEMATYCZNY

W pracy zastosowano model matematyczny zjawisk cieplno-wilgotnościowych oraz odkształceń i naprężeń w porowatych materiałach budowlanych, zaproponowany w [9, 10], bazujący na mechanice ośrodków porowatych. Degradacja mechaniczna (pękanie materiału) i jej wpływ na zjawiska transportu masy i energii były modelowane podobnie jak w [18] dla betonu w wysokiej temperaturze. Poniżej przedstawiono podsumowanie najważniejszych równań modelu matematycznego i metodę jego rozwiązania numerycznego.

Materiały budowlane modelowane są jako wielofazowe ośrodki porowate, będące lokalnie w stanie równowagi termodynamicznej. Ich stan opisany jest za pomocą następujących zmiennych: ciśnienia gazu  $p^g$ , ciśnienia kapilarnego  $p^c = p^g - p^w$  ( $p^w$  oznacza ciśnienie wody), temperatury  $T$ , wektora przemieszczeń szkieletu  $\mathbf{u}$ , oraz parametru zniszczenia  $d$ , będącego zmienną wewnętrzną, opisującą pękanie materiału zgodnie z teorią zniszczenia [15]. Model matematyczny tworzą cztery równania bilansu:

- *bilans masy suchego powietrza*, uwzględniający przepływ adwekcyjny i dyfuzyjny cząstek powietrza:

$$\begin{aligned} & -n \frac{D^s S_w}{Dt} - \beta_s (1-n) S_g \frac{D^s T}{Dt} + \alpha S_g \operatorname{div} \mathbf{v}^s \\ & + \frac{S_g n}{\rho^{ga}} \frac{D^s \rho^{ga}}{Dt} + \frac{1}{\rho^{ga}} \operatorname{div} \mathbf{J}_g^{ga} \\ & + \frac{1}{\rho^{ga}} \operatorname{div} (n S_g \rho^{ga} \mathbf{v}^{gs}) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie  $n$  = porowatość,  $S_w$  = stopień nasycenia porów cieplą wodą,  $S_g = 1 - S_w$  = stopień nasycenia porów gazem,  $\rho^\pi$  = gęstość składnika  $\pi$  ( $\pi = s, w, g, ga, gw$  oznacza odpowiednio: szkielet, wodę, fazę gazową, suche powietrze i parę wodną),  $\mathbf{J}_g^\pi$  = dyfuzyjny strumień masy suchego powietrza lub pary wodnej w fazie gazowej,  $\mathbf{v}^\pi$  = prędkość składnika  $\pi$  względem szkieletu,  $\alpha$  = stała Biota.

- *bilans masy wody*, uwzględniający adwekcyjny przepływ ciepłej i gazowej wody, oraz dyfuzyjny strumień pary wodnej i przemianę fazową woda - para wodna:

$$\begin{aligned} & n(\rho^w - \rho^{gw}) \frac{D^s S_w}{Dt} + S_g n \frac{D^s \rho^{gw}}{Dt} \\ & + (\rho^w S_w + \rho^{gw} S_g) \alpha \operatorname{div} \mathbf{v}^s + \operatorname{div} \mathbf{J}_g^{gw} \\ & + \operatorname{div} (n S_w \rho^w \mathbf{v}^{ws}) + \operatorname{div} (n S_g \rho^{gw} \mathbf{v}^{gs}) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

- *bilans entalpii ośrodka wielofazowego*, uwzględniający ciepło przemian fazowych woda - para wodna:

$$\begin{aligned} & (\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_w C_p^w \mathbf{v}^w + \rho_g C_p^g \mathbf{v}^g) \cdot \operatorname{grad} T + \\ & - \operatorname{div} (\lambda_{\text{eff}} \operatorname{grad} T) = -\dot{m}_{\text{vap}} \Delta H_{\text{vap}} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie  $C_p^\pi$  = izobaryczne ciepło właściwe płynów,  $\lambda_{\text{eff}}$  = efektywny wsp. przewodzenia ciepła zawilgoconego ośrodka,  $\dot{m}_{\text{vap}}$  = natężenie źródeł masy wody wskutek parowania,  $\Delta H_{\text{vap}}$  = entalpia parowania.

- *równanie równowagi mechanicznej ośrodka*:

$$\operatorname{div} (\boldsymbol{\sigma}_e^s - \alpha p^s \mathbf{I}) + \rho \mathbf{g} = 0, \quad (4)$$

gdzie naprężenie efektywne netto  $\boldsymbol{\sigma}_e^s$  dane jest jako:

$$\boldsymbol{\sigma}_e^s = (1-d) \boldsymbol{\Lambda}_0 : (\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{tot}} - \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{th}} - \boldsymbol{\varepsilon}_0), \quad (5)$$

$d$  = parametr zniszczenia wynikającego z degradacji natury mechanicznej,  $\boldsymbol{\Lambda}_0$  = tensor sprężystości dla niezniszczonego materiału,  $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{tot}}$  = tensor odkształceń całkowitych,  $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{th}}$  = tensor odkształceń termicznych,  $\boldsymbol{\varepsilon}_0$  = tensor odkształceń autogenicznych, np. pelzania (nie uwzględnianych w niniejszej pracy). Należy podkreślić, że w opisywanym modelu odkształcenia skurczowe materiału modelowane są jako efekt działania „obciążenia wewnętrznego”, wywołanego tzw. naprężeniami efektywnymi  $\boldsymbol{\sigma}_e^s$  [13], do wyznaczenia których niezbędna jest funkcja materiałowa  $\alpha \chi_s^{ws}(S_w)$  i izoterma sorpcji  $S_w(p^c)$ , które powinny być wyznaczone eksperymentalnie.

Równanie ewolucji, opisujące postępowanie procesu degradacji mechanicznej, ma następującą postać:

$$d(t) = d(\tilde{\varepsilon}(t)), \quad (6)$$

gdzie parametr zniszczenia mechanicznego zależy od tzw. odkształcenia ekwiwalentnego  $\tilde{\varepsilon}$ , zdefiniowanego tak, jak w klasycznej teorii zniszczenia Pijaudiera-Cabota w sformułowaniu nielokalnym [15].

Aby było możliwe rozwiązanie zagadnienia początkowo-brzegowego (1)-(4), należy odpowiednio zdefiniować warunki brzegowe dla wszystkich zmiennych stanu ośrodka, w tym na powierzchni zewnętrznej, gdzie panują zmienne w czasie warunki pogodowe [16]. Równania różniczkowe (1)-(4), po wprowadzeniu odpowiednich związków konstytutywnych i materiałowych, rozwiązano numerycznie stosując metodę elementu skończonego [19]. W tym celu zmienne stanu wyrażono w funkcji ich wartości węzłowych:

$$\begin{aligned} p^g(t) & \cong \mathbf{N}_p \bar{\mathbf{p}}^g(t), & p^c(t) & \cong \mathbf{N}_p \bar{\mathbf{p}}^c(t), \\ T(t) & \cong \mathbf{N}_t \bar{\mathbf{T}}(t), & \mathbf{u}(t) & \cong \mathbf{N}_u \bar{\mathbf{u}}(t), \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie  $\mathbf{N}_\pi$  = funkcje kształtu ( $\pi = p, t, u$ ).

Słabą sformułowanie równań modelu (1)-(4) otrzymano w [10] za pomocą metody Galerki. Po zastosowaniu twierdzenia Greena można je zapisać następująco [10]:

$$\mathbf{C}_{ij}(\bar{\mathbf{x}}_j) \frac{\partial \bar{\mathbf{x}}_j}{\partial t} + \mathbf{K}_{ij}(\bar{\mathbf{x}}_j) \bar{\mathbf{x}}_j = \mathbf{f}_i(\bar{\mathbf{x}}_j), \quad (8)$$

$$\mathbf{C}_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{gg} & \mathbf{C}_{gc} & \mathbf{C}_{gt} & \mathbf{C}_{gu} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{cc} & \mathbf{C}_{ct} & \mathbf{C}_{cu} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{tc} & \mathbf{C}_{tt} & \mathbf{C}_{tu} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{x}}_j = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{p}}^g \\ \bar{\mathbf{p}}^c \\ \bar{\mathbf{T}} \\ \bar{\mathbf{u}} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{gg} & \mathbf{K}_{gc} & \mathbf{K}_{gt} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{cg} & \mathbf{K}_{cc} & \mathbf{K}_{ct} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{tg} & \mathbf{K}_{tc} & \mathbf{K}_{tt} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{ug} & \mathbf{K}_{uc} & \mathbf{K}_{ut} & \mathbf{K}_{uu} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_g \\ \mathbf{f}_c \\ \mathbf{f}_t \\ \mathbf{f}_u \end{bmatrix},$$

gdzie nieliniowe macierze  $\mathbf{C}_{ij}(\bar{\mathbf{x}}_j)$ ,  $\mathbf{K}_{ij}(\bar{\mathbf{x}}_j)$  i  $\mathbf{f}_i(\bar{\mathbf{x}}_j)$  są opisane szczegółowo w [10, 18]. Układ równań (8) scałkowano po czasie stosując w pełni niejawną schemat metody różnic skończonych [19].

Stosując opisane powyżej metody numeryczne, opracowano program komputerowy HMTRA-CLIMA, za pomocą którego wykonano wszystkie symulacje, przedstawione w rozdziale 4. Do zdefiniowania warunków brzegowych na zewnętrznych powierzchniach przegród budowlanych wykorzystano model deszczu ukośnego [14] oraz dane pogodowe Typowego Roku Meteorologicznego dla Warszawy [16]. Program dysponuje także danymi pogodowymi TRM dla Krakowa i Kołobrzegu [17].

#### 4. WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

Doświadczenie pokazuje, że degradacja zewnętrznych tynków budynków w Polsce następuje najczęściej wskutek odspojenia tynku od materiału podłoża. Istotną rolę może tu odgrywać strefa przejściowa, występująca na styku tynku i materiału ściany, gdyż charakteryzuje się ona zwiększoną porowatością oraz gorszymi właściwościami wytrzymałościowymi w stosunku do materiału tynku poza tą strefą.

W niniejszym rozdziale przeanalizowano wpływ strefy przejściowej, występującej na styku tynku i betonu komórkowego, na naprężenia w tej strefie, które wywołane są zmiennym w czasie stanem cieplno-wilgotnościowym ściany. W tym celu rozwiązano 1-wymiarowe zagadnienie modelowe, dotyczące 36-cm ściany wykonanej z betonu komórkowego, obustronnie otynkowanej tynkiem cementowym, poddanej oddziaływaniu polskich warunków klimatycznych, przyjętych w postaci danych pogodowych TRM dla Warszawy [16]. Zadanie rozwiązano dla dwóch przypadków tynku zewnętrznego: z uwzględnieniem trzech stref o zróżnicowanych właściwościach w warstwie tynku (nazywanego dalej tynkiem z MSP), oraz przy założeniu jednorodnych właściwości tynku w całej jego grubości (określanego jako tynk jednorodny). Najważniejsze właściwości transportowe i wytrzymałościowe materiałów, przyjęte w naszych symulacjach, ze-

stawiono w Tabelach 1 i 2. Zostały one określone na podstawie ich korelacji z parametrami struktury wewnętrznej, wg danych dla kompozytów cementowych podanych w [20], oraz wyników badań porowatości, przeprowadzonych metodą SMO. Dla strefy przypowierzchniowej tynku założono takie same właściwości, jak dla strefy MSP. Obliczenia wykonano dla osiowo-symetrycznego modelu ściany, z osią  $z$  wzdłuż jej grubości, który składa się z 200 jednakowych elementów skończonych ( $200 \times 1$ ) o szerokości 2 mm oraz promieniu 4 mm. Aby uzyskać stan naprężeń i odkształceń, odpowiadający ścianie o nieskończonej powierzchni (tj. przy promieniu  $r \rightarrow \infty$ ), uwzględniono dodatkowy pierścień ekwiwalentnego ośrodka wokół analizowanego walcowego modelu ściany, o odpowiednio dobranych: module sprężystości Younga i współczynnika Poissona. Ośrodek ten zastępuje pozostałą część ściany w taki sposób, aby reakcje na obwodzie analizowanego wycinka ściany były takie same, jak w ścianie o nieskończonej powierzchni.

Analizowano dwa skrajne przypadki „obciążenia higrotermicznego” ściany: elewację zachodnią – z największym obciążeniem deszczem ukośnym, wywołanym dominującym kierunkiem wiatru w Warszawie, oraz południową – z największym natężeniem promieniowania słonecznego, powodującego nagrzewanie się zewnętrznej elewacji ściany.

Tabela 1. Właściwości transportowe materiałów, przyjęte w symulacjach komputerowych.

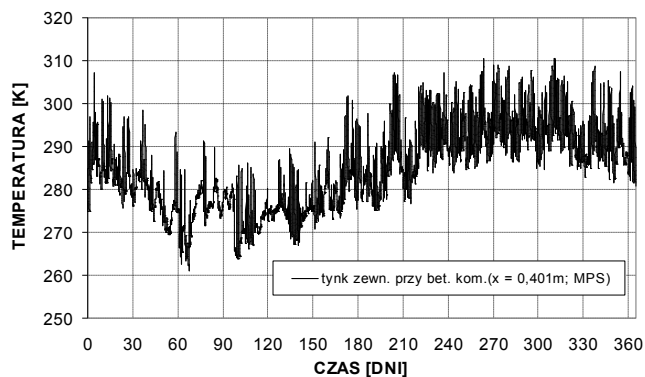
Table 1. Transport properties of the materials, assumed in computer simulations.

Materiał	Porowatość [%]	Gęstość pozorna [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Wsp. przepus. [ $\text{m}^2$ ]	Wsp. przew. ciepła [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]
Beton komórk.	70	400	$5.0 \times 10^{-16}$	0.14
Tynk cement.	17	2200	$9.0 \times 10^{-19}$	0.80
Strefa MSP	25	1990	$2.4 \times 10^{-18}$	0.80

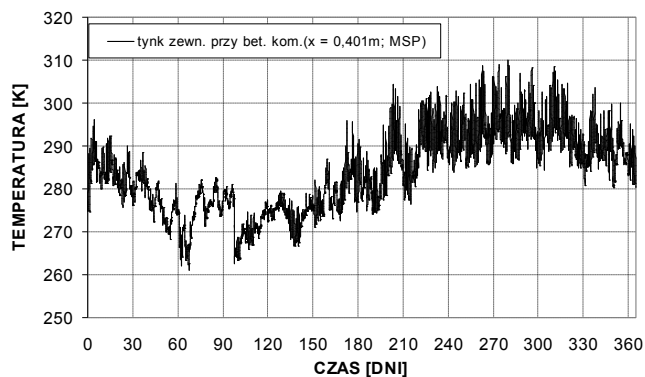
Tabela 2. Właściwości wytrzymałościowe materiałów, przyjęte w symulacjach komputerowych.

Table 2. Strength properties of the materials, assumed in computer simulations.

Materiał	Moduł Younga [GPa]	Wsp. Poissona [-]	Wytrzn. na ściskanie [MPa]	Wytrzn. na rozciąganie [MPa]
Beton komórk.	2.4	0.20	4.50	0.50
Tynk cement.	8.0	0.175	7.40	0.82
Strefa MSP	7.8	0.175	7.04	0.78



a



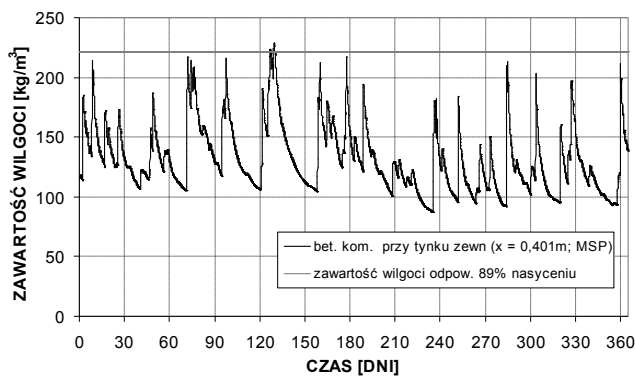
b

Rys. 4. Historia zmian temperatury na styku tynku zewnętrznego i betonu komórkowego na elewacji budynku w Warszawie: a) elewacja południowa; b) elewacja zachodnia.

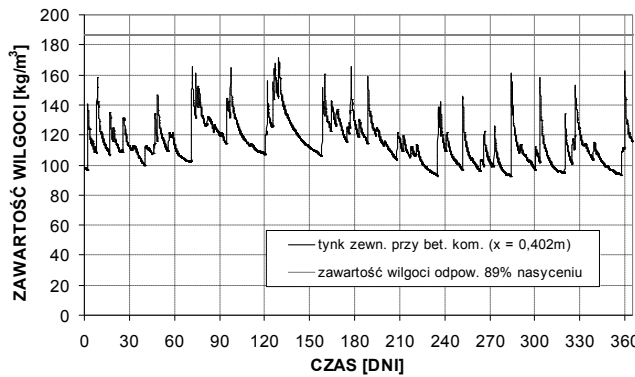
Fig. 4. History of temperature changes at the interface of external stucco and AAC on the façade of building located in Warsaw: a) southern façade; b) western façade.

Symulacje wykonano dla czterech wymienionych uprzednio przypadków ściany (tj. dla dwóch różnych orientacji elewacji: południowej i zachodniej, oraz dwóch przypadków tynku zewnętrznego: jednorodnego i z MSP), dla okresu 1 roku, poczynając od 1 października, przyjmując krok czasowy obliczeń równy 1 godzinie. Wyniki obliczeń, w postaci wykresów przebiegu zmian temperatury, zawartości wilgoci oraz naprężeń stycznych w płaszczyźnie kontaktu tynku i betonu komórkowego, przedstawiono graficznie na Rysunkach 4 - 8.

Rozkład temperatury w ścianie praktycznie nie zależał od tego, czy w obliczeniach przyjęto jednorodne właściwości tynku czy też uwzględniono u nich strefę MSP, więc na Rys. 4 pokazano jedynie wyniki symulacji dla dwóch analizowanych orientacji elewacji budynku. Jak widać na Rys.4, temperatura w tynku zewnętrznym na elewacji południowej jest wyraźnie wyższa, od kilku do nawet kilkunastu stopni, zwłaszcza w okresie zimowym, gdy promienie słoneczne padają pod większym kątem do powierzchni ściany. Charakteryzuje się ona też większymi amplitudami wahań dobowych, co może być przyczyną



a

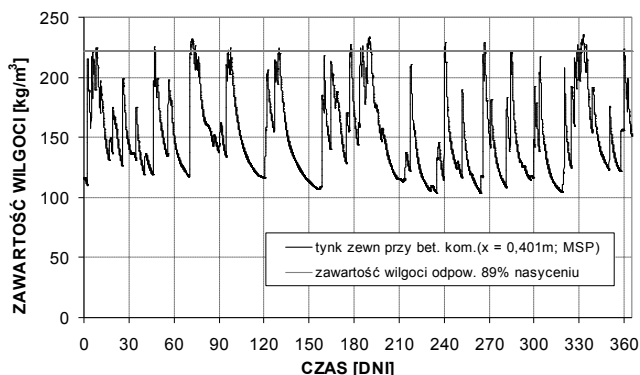


b

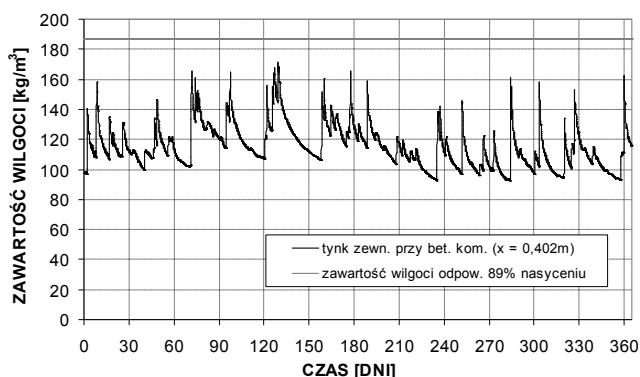
Rys. 5. Historia zmian zawartości wilgoci na styku tynku zewnętrznego i betonu komórkowego na elewacji południowej budynku w Warszawie: a) z uwzględnieniem MSP; b) bez MSP.

Fig. 5. History of moisture content changes at the interface of external stucco and AAC on the southern façade of building located in Warsaw: a) considering ITZ; b) without ITZ.

większej zmienności naprężeń w tynku zewnętrznym. Na Rys. 5 porównano zmiany zawartości wilgoci w płaszczyźnie styku zewnętrznego tynku z betonem komórkowym dla przypadków tynku jednorodnego i z uwzględnieniem MSP, występujących na elewacji południowej. Na Rys. 5 i 6 zaznaczono dodatkowo poziom wilgotności, odpowiadający 89% nasyceniu porów tynku ciepłą wodą, który można uznać za niebezpieczny w przypadku wystąpienia ujemnych temperatur, gdyż powstaną wówczas warunki sprzyjające zniszczeniom mrozowym tynku [20]. Jak widać, uwzględnienie w obliczeniach warstwowej struktury tynku z MSP, powoduje otrzymanie wyższych zawartości wilgoci oraz wyższych wartości nasycenia porów wodą. Może to być istotne przy ocenie trwałości tynku, a zwłaszcza naprężeń, wywołanych zmianami zawartości wilgoci, oraz podczas analizy zagrożenia zniszczeniami mrozowymi. Bliższe dane na temat okresu występowania warunków sprzyjających degradacji mrozowej (tj.  $T < 0^{\circ}\text{C}$  i  $S_w > 89\%$ ), dla wszystkich analizowanych przypadków zestawiono w Tabeli 3. Wynika z nich, że w Warszawie podczas TRM, na elewacji zachodniej i po-



a



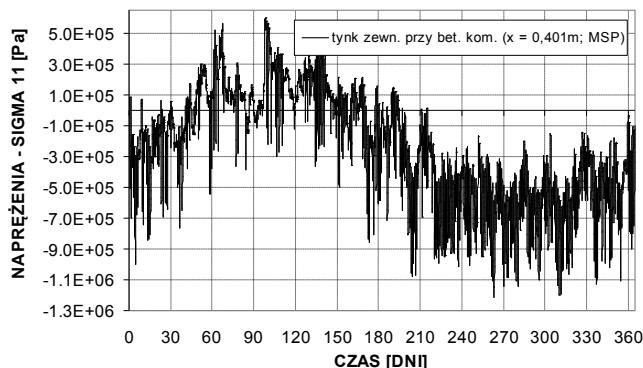
b

Rys. 6. Historia zmian zawartości wilgoci na styku tynku zewnętrznego i betonu komórkowego na elewacji zachodniej budynku w Warszawie: a) z uwzględnieniem MSP; b) bez MSP.

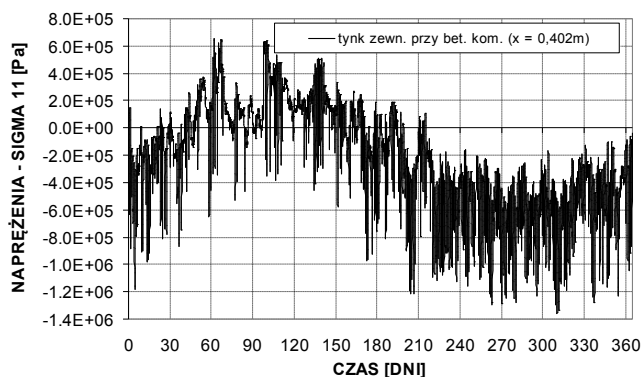
Fig. 6. History of moisture content changes at the interface of external stucco and AAC on the western façade of building located in Warsaw: a) considering ITZ; b) without ITZ.

łudniowej analizowanego budynku praktycznie nie występują warunki mogące wywołać zniszczenia mrozowe. Wyniki symulacji zawartości wilgoci w tynku zewnętrznym na elewacji zachodniej, mają podobny charakter jak, omówione poprzednio, wyniki dla elewacji południowej, choć zawartości wilgoci mają nieco wyższe wartości.

Wyniki symulacji, dotyczące naprężeń stycznych w płaszczyźnie kontaktu tynku z betonem komórkowym, na elewacjach ścian o orientacji południowej i zachodniej, w budynku zlokalizowanym w Warszawie, przedstawiają odpowiednio Rysunki 7 i 8. Jak widać, w okresie zimowym w tynku występują naprężenia rozciągające, a latem – ściskające. Wartości tych pierwszych na elewacji południowej nie przekraczają wartości ok. 0.65 MPa, a na elewacji zachodniej ok. 0.75 MPa, a więc są nieco niższe od wytrzymałości tynku na rozciąganie, wynoszącej ok. 0.8 MPa. W przypadku naprężeń ściskających, występujących latem, ich wartości nie przekraczają ok. 1.35 MPa na elewacji południowej i ok. 1.3 MPa – na zachodniej, a więc są wyraźnie niższe od wytrzymałości tynku na ści-



a



b

Rys. 7. Historia zmian naprężeń na styku tynku zewnętrznego i betonu komórkowego na elewacji południowej budynku w Warszawie: a) z uwzględnieniem MSP; b) bez MSP.

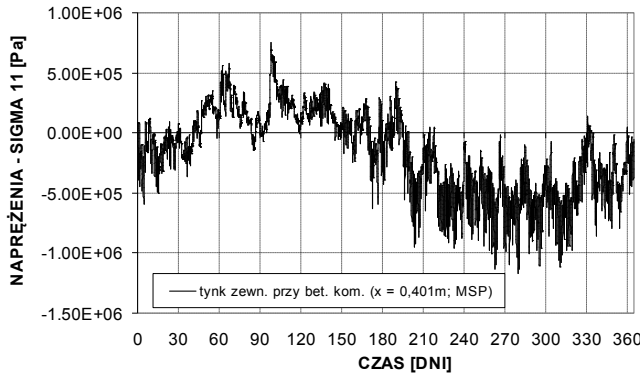
Fig. 7. History of stress changes at the interface of external stucco and AAC on the southern façade of building located in Warsaw: a) considering ITZ; b) without ITZ.

Tabela 3. Wyniki symulacji dotyczące ekstremalnych naprężeń [MPa],  $\sigma_{\max}$  i  $\sigma_{\min}$ , na styku tynku z betonem komórkowym, oraz liczba godzin  $N_{fr}$ , gdy zawartość wilgoci i temperatura sprzyjają wystąpieniu zniszczeń mrozowych.

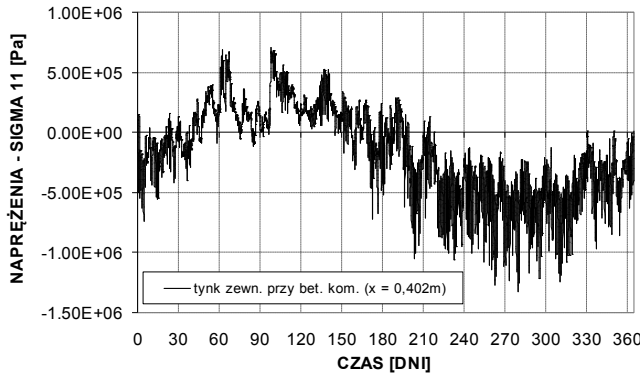
Table 3. Results of simulations concerning extreme stresses [MPa],  $\sigma_{\max}$  and  $\sigma_{\min}$  at the cement stucco/ACC interface, and number of hours  $N_{fr}$ , when moisture content and temperature promote frost damage.

Orientacja elewacji	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\sigma_{\min}$ [MPa]	$N_{fr}$ [h]
południowa	0.60	-1.21	0
zachodnia	0.76	-1.17	4
południowa (bez MSP)	0.66	-1.36	0
zachodnia (bez MSP)	0.71	-1.32	4

skanie, wynoszącej ok. 7 MPa. W związku z tym, można stwierdzić, że zarówno w okresie zimowym, jak i letnim, nie powinno wystąpić pęknięcie tynku. Jednak w okresie zimowym, gdy obserwuje się naprężenia rozciągające dość bliskie wytrzymałości materiału  $S_t$ , występują warunki sprzyjające degradacji mrozowej. Wystąpi ona, gdy



a



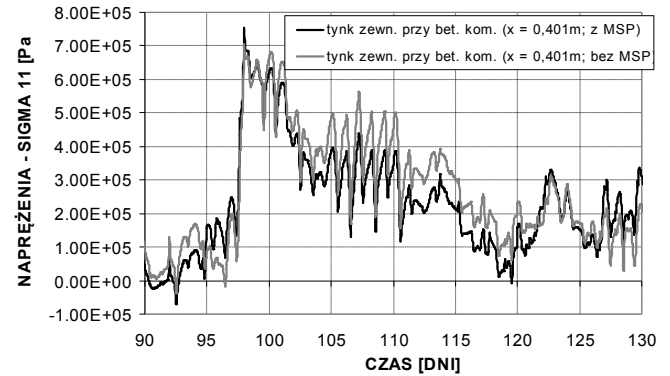
b

Rys. 8. Historia zmian naprężeń na styku tynku zewnętrznego i betonu komórkowego na elewacji zachodniej budynku w Warszawie: a) z uwzględnieniem MSP; b) bez MSP.

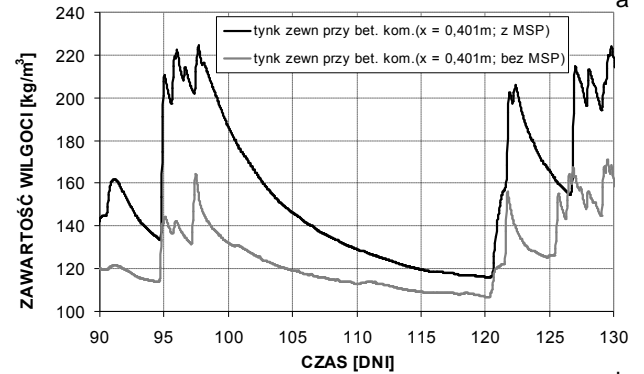
Fig. 8. History of stress changes at the interface of external stucco and AAC on the western façade of building located in Warsaw: a) considering ITZ; b) without ITZ.

naprężenia rozciągające w materiale, powstałe wskutek wzrostu objętości wody podczas jej zamarzania w porach, przekroczą wartość graniczną  $S_t$ .

Aby dokładniej przeanalizować konsekwencje uwzględnienia w symulacjach strefy MSP na styku tynku i ściany gazobetonowej lub jej pominięcia, na Rys. 9 porównano wyniki w wybranym 40-dniowym przedziale czasu, dla tych wariantów przy zachodniej orientacji elewacji budynku. Jak widać, zarówno zawartość wilgoci, jak i naprężenia styczne są wyższe w przypadku tynku z MSP niż w tynku jednorodnym. Różnice chwilowych wartości naprężeń osiągają nawet 0.15 MPa, a zawartości wilgoci – 60 kg/m<sup>3</sup>, co pokazuje, jak bardzo istotne są różnice właściwości fizycznych i wynikające z nich odmienne zachowanie się, w tych samych warunkach pogodowych, tynku jednorodnego oraz tynku z MSP i warstwą przypowierzchniową. Niejednorodności struktury wewnętrznej i właściwości tynku nie były dotychczas uwzględniane w symulacjach komputerowych, a mogą mieć one kluczowe znaczenie przy ocenie trwałości tynku zewnętrznego poddanego oddziaływaniu zmiennych warunków pogodowych w Polsce.



a



b

Rys. 9. Porównanie historii zmian naprężeń (a) i zawartości wilgoci (b) na styku tynku zewnętrznego i betonu komórkowego na zachodniej elewacji budynku, z uwzględnieniem MSP w tynku (linia gruba) i z jej pominięciem (linia cienka).

Fig. 9. Comparison of the time histories of tangential stress (a) and moisture content (b) at stucco/AAC interface at the western façade of a building, obtained from simulations considering the ITZ in the stucco (thick line) and omitting it (thin line).

## 5. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych struktury wewnętrznej warstwy tynku na podłożu z betonu komórkowego. Wskazują one na istnienie międzyfazowej strefy przejściowej na styku tych materiałów oraz strefy przypowierzchniowej, o podwyższonej porowatości i przepuszczalności oraz obniżonych właściwościach wytrzymałościowych. Korzystając z optycznej mikroskopii skaningowej oszacowano grubości poszczególnych stref w warstwie tynku na podłożu z betonu komórkowego. Krótko przedstawiono też model matematyczny zjawisk transportu masy, pędu i energii w odkształcalnych, porowatych materiałach budowlanych oraz metodę jego numerycznego rozwiązania. Umożliwiają one prowadzenie ilościowych analiz zjawisk cieplno-wilgotnościowych oraz naprężeń i odkształceń w 2-wymiarowych elementach budowlanych, poddanych działaniu zmiennych wa-

runków klimatu zewnętrznego, dając wyniki zgodne z opublikowanymi badaniami doświadczalnymi.

Przeprowadzone analizy wskazują, że uwzględnienie podczas obliczeń faktu występowania w tynku zewnętrznym strefy przejściowej i przypowierzchniowej, o odmiennych właściwościach niż tynk dojrzewający w warunkach laboratoryjnych, wpływa wyraźnie na wyniki symulacji, dotyczących zmian zawartości wilgoci i naprężeń w tynku zewnętrznym, poddanym oddziaływaniu zmiennych warunków pogodowych. Może to mieć istotne znaczenie podczas prognozowania trwałości przegród budowlanych w polskich warunkach klimatycznych.

#### EFFECT OF THE ITZ ON THE HYGRO-THERMAL STATE AND STRESSES IN THE STUCCO OF AN AAC-WALL

**Summary:** The results of laboratory tests, concerning the width and physical properties of the the cement stucco/AAC interface, are presented. These results are applied during computer simulations of the hygro-thermal phenomena and stresses in the stucco of an AAC wall, exposed to the weather conditions of TMY for Warsaw. The simulations are performed by means of the numerical model HMTRA-CLIMA, developed by authors, for analysis of coupled hygro-thermal and degradation phenomena in porous building materials. They show that the ITZ layer at the cement stucco/AAC interface has an important effect on the simulation results.

#### Literatura

- [1] Hens H., *Final Report of the IEA-Annex 24 project*, ACCO, Leuven, 1996.
- [2] Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A., *Hygro-thermo-chemo-mechanical modelling of concrete at early ages and beyond. Part II: Shrinkage and creep of concrete*. Int. J. Num. Meth. Engrg. 67(2006) 332-363.
- [3] Glasser F.P., Marchand J., Samson E., *Durability of concrete – degradation phenomena involving detrimental chemical reactions*. Cement and Concrete Research. 38 (2008) 226-246.
- [4] Koniorczyk M., Gawin D., *Heat and moisture transport in porous building materials containing salt*, Journal of Building Physics. 31(2008) 279-300.
- [5] Pavlík Z., Michálek P., Pavlíková M., Kopecká I., Maxová I., Černý R., *Water and salt transport and storage properties of Mšené sandstone*. Construction and Building Materials. 22 (2008)1736-1748.
- [6] Roels S., Moonen P., De Proft K., Carmeliet J., *A coupled discrete-continuum approach to simulate moisture effects on damage processes in porous materials*. Computer Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 195 (2006) 7139-7153.
- [7] Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A., *Modelling of deformations of high strength concrete at elevated temperatures*. Materials and Structures 37 (2004) 218-236.
- [8] Taejun Cho, *Prediction of cyclic freeze–thaw damage in concrete structures based on response surface method*. Constr. and Building Materials. 21 (2007) 2031-2040.
- [9] Gawin D., Schrefler B.A., *Thermo- hydro- mechanical analysis of partially saturated porous materials*. Engineering Computations, 13 (1996) 113-143.
- [10] Gawin D., *Modelowanie sprzężonych zjawisk cieplno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych*, Zeszyty Naukowe PŁ Nr 853, Rozprawy Naukowe z. 279, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2000.
- [11] Gawin D., Koniorczyk M., Więckowska A., Kossecka E., *Effect of Moisture on Hygrothermal and Energy Performance of a Building with Cellular Concrete Walls in Climatic Conditions of Poland*, ASHRAE Transactions 110 (2004) 795-803.
- [12] Gawin D., Wyrzykowski M., Pesavento F., *Modeling hygro-thermal performance and strains of cementitious building materials maturing in variable conditions*. Journal of Building Physics 31 (2008) 301-318.
- [13] Gray W.G., Schrefler B.A., *Analysis of the solid phase stress tensor in multiphase porous media*. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 31 (2007) 541-581.
- [14] Künzeli H.M., *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1995.
- [15] Pijaudier-Cabot J., *Non-local damage*. Mühlhaus H.B. (red.), *Continuum models for materials with microstructure*, 105–143, Wiley & Sons, Chichester, 1995.
- [16] Gawin D., Kossecka, E. (red.), *Typowy Rok Meteorologiczny i jego zastosowanie do symulacji wymiany ciepła i masy w budynkach*, Wyd. Polit. Łódzkiej, Łódź, 2002.
- [17] Gawin D. (red.), *Modelowanie naprężeń i degradacji zewnętrznych warstw przegród budowlanych poddanych oddziaływaniu zmiennych warunków klimatu wewnętrznego i zewnętrznego*, Raport końcowy projektu Nr 4T07E 032 30, Politechnika Łódzka, 2008.
- [18] Gawin D., Pesavento F., Schrefler, B.A., *Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 192 (2003) 1731-1771.
- [19] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., *The Finite Element Method*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [20] Neville A.M., *Properties of concrete, Fourth Edition*, Longman, Essex, 1995.

#### Podziękowania

Badania zostały wykonane w ramach grantu Nr 4 T07E 032 30 „Modelowanie naprężeń i degradacji zewnętrznych warstw przegród budowlanych poddanych oddziaływaniu zmiennych warunków klimatu wewnętrznego i zewnętrznego”, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.