

mgr inż. Ewelina Fic^{1*)}
mgr inż. Marek Łukomski¹⁾

Analiza wpływu izolacji termicznej na rozkład temperatury wewnątrz konstrukcji murowych w warunkach pożaru

Analysis of the thermal insulation influence on temperature distribution within the masonry structures under fire conditions

DOI: 10.15199/33.2015.07.01

Streszczenie. W artykule opisano zagadnienia wpływu izolacji termicznej (ocieplenia ścian) na nośność konstrukcji murowych w warunkach pożaru. Przedstawiono analizę porównawczą przewodności cieplnej izolowanych i nieizolowanych elementów murowych, przeprowadzoną w celu jakościowej oraz ilościowej oceny stopnia degradacji termicznej i mechanicznej murów poddanych działaniu temperatury pożarowej. Szczególną uwagę poświęcono ocenie wpływu rozkładu temperatury na utratę nośności muru. Przedstawione obliczenia analityczne wykonano na podstawie metodyki oraz zależności podanych w Eurokodach. **Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo pożarowe, odporność ogniowa, mur, przewodność cieplna, nośność ogniowa.

Abstract. In this article influence of the thermal insulation (external thermal insulation) on load capacity of the masonry structures under fire conditions are described. Comparative analysis of thermal conductivity of insulated and not insulated masonry components was carried out in order to qualitative and quantitative assessment of thermal and mechanical degradation of masonry structures exposed to high temperatures. Special consideration was paid to assessment of temperature distribution on the load capacity loss of the structure. Presented analytical calculations were carried out in accordance with methodology and formulas described in Eurocodes. **Keywords:** fire safety, fire resistance, masonry structure, thermal conductivity, load bearing capacity.

Ekspozycja elementów murowych na działanie wysokiej temperatury będącej rezultatem pożaru inicjuje wiele procesów fizykochemicznych, które powinny być poddane analizie w celu oceny ich wpływu na podstawowe parametry wytrzymałościowe konstrukcji murowych. Najważniejsze parametry, których znajomość jest niezbędna, to:

- właściwości cieplne (parametry termiczne) umożliwiające wyznaczenie pola temperatury we wnętrzu analizowanego elementu murowego, tj. ciepło właściwe – c [J/kg·K] oraz współczynnik przewodzenia ciepła – λ [W/m·K];
- gęstość właściwa – ρ [kg/m³];
- rozszerzalność termiczna – α , a przede wszystkim współczynnik rozszerzalności liniowej Δl [%];
- właściwości mechaniczne umożliwiające określenie nośności muru, tj. wytrzymałość charakterystyczna i ewentualnie odkształcalność.

Wartości parametrów określających właściwości cieplne (termiczne) materiałów budowlanych, z których wykony-

wane są typowe konstrukcje murowe, są dostępne w literaturze, zwykle w postaci zestawień tabelarycznych. Należy jednak zaznaczyć, że są one podawane zwykle dla warunków ustalonych i ściśle określonej temperatury odniesienia (najczęściej 0 °C lub 20 °C). W celu wyznaczenia zmiennego w czasie pola temperatury wewnątrz analizowanej konstrukcji konieczne jest uwzględnienie zmienności w czasie wartości kluczowych, w kontekście procesu wymiany ciepła, parametrów cieplnych (termicznych) materiałów z temperaturą, z których wykonana jest konstrukcja. Zmienność parametrów cieplnych (termicznych) typowych materiałów budowlanych w funkcji temperatury przedstawiono na rysunku 1.

Oddziaływanie termiczne związane z nagrzewaniem w warunkach pożaru skutkuje różnymi konsekwencjami w zależności od materiałów, z których wykonana jest konstrukcja murowa, np. w silikatach i wyrobach z gliny nagrzewanie i związany z nim wzrost temperatury skutkuje rozszerzalnością liniową materiału, podczas gdy beton lekki i komórkowy ulega kurczeniu. Przykładowe wartości zmienności wydłużenia ter-

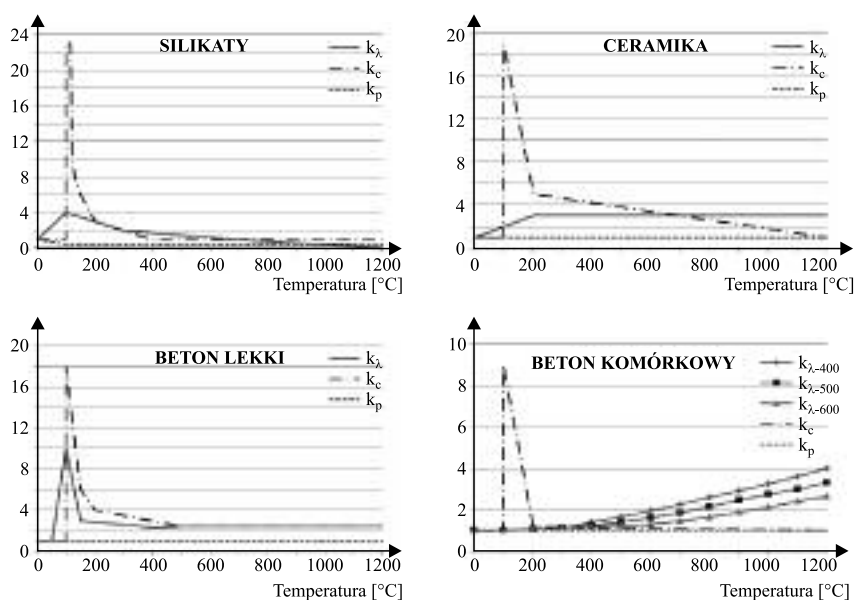
micznego Δl w funkcji temperatury typowych materiałów budowlanych przedstawiono na rysunku 2.

W kontekście analizy zachowania typowych konstrukcji murowych w warunkach pożaru nieodzowne jest również uwzględnienie właściwości cieplnych zastosowanej zaprawy. Jest to szczególnie istotne w sytuacji, kiedy właściwości cieplne zaprawy znacznie odbiegają od właściwości spajanych elementów, co w rezultacie skutkuje niejednorodnymi właściwościami cieplnymi całej konstrukcji. Przykładowe wartości zmienności wydłużenia termicznego Δl w funkcji temperatury dla zaprawy cementowo-wapiennej przedstawiono na rysunku 3.

Podczas nagrzewania elementów murowych obserwuje się również ich dużą odkształcalność, powodującą zmniejszenie modułu sprężystości muru. Obniżenie wytrzymałości występuje odpowiednio w przypadku betonu lekkiego powyżej 550 °C; betonu komórkowego powyżej 650 °C; silikatów powyżej 750 °C. Działanie podwyższonej temperatury oraz brak możliwości swobodnego odkształcenia powoduje wewnątrz konstrukcji murowych występowanie naprężeń cieplnych (termicznych) mogących

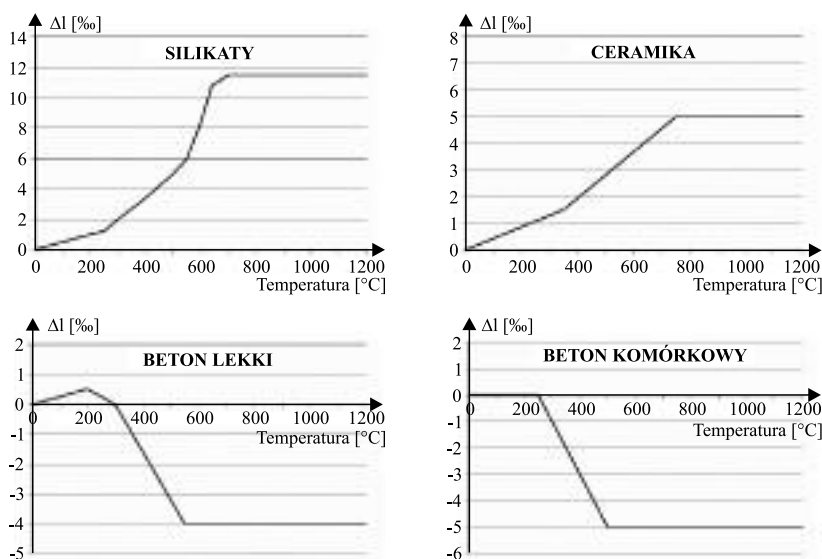
¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniowych

^{*)} Autor do korespondencji: e-mail: e.fic@itb.pl



Rys. 1. Zmienność właściwości cieplnych typowych materiałów budowlanych w funkcji temperatury t [°C] (k_λ – zmiana wartości współczynnika przewodzenia ciepła; k_c – zmiana wartości pojemności cieplnej właściwej; k_p – zmiana gęstości właściwej)

Fig. 1. Variation of the thermal properties of typical building materials with temperature t [°C] (k_λ – change of the thermal conductivity coefficient; k_c – change of specific heat capacity; k_p – change of the specific density)



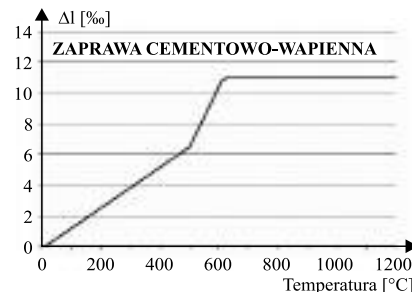
Rys. 2. Zmienność wydłużenia termicznego Δl [%] dla elementów murowych w funkcji temperatury t [°C]

Fig. 2. Variation of the thermal elongation Δl [%] of masonry elements with temperature t [°C]

istotnie wpływać na parametry wytrzymałościowe konstrukcji.

Odształcenia cieplne (termiczne) mogą prowadzić do znacznych deformacji konstrukcji murowych oraz występowania sił ścinających. Przekroczenie granicznej wartości wytrzymałości na ścinanie prowadzi do odłupywania zewnętrznej, nagrzewanej powierzchni elementów murowych. Na zasięg i intensywność odpadania wpły-

wa rodzaj elementu murowego, tzn. wymiary, grubość ścianek oraz materiał, z jakiego został wykonany. Najbardziej narażone na degradację są mury cienkościennie oraz drażone, gdyż występuje w nich szybszy przyrost temperatury. Odpadanie zewnętrznej warstwy muru skutkuje zmniejszeniem pojemności cieplnej struktury i w konsekwencji przyspieszeniem procesu przewodzenia ciepła (większym wzrostem



Rys. 3. Zmienność wydłużenia termicznego Δl [%] zaprawy w funkcji temperatury t [°C]
Fig. 3. Variation of the thermal elongation Δl [%] of the mortar with temperature t [°C]

temperatury w przekroju poprzecznym) oraz szybszym zniszczeniem konstrukcji. Zmniejszenie przekroju poprzecznego wpływa również na postępujący spadek szczelności i izolacyjności konstrukcji, zwiększając temperaturę po stronie nienagrzewanej.

Przyczyny powstawania odształceń w murze poddanym jednoczesnemu działaniu temperatury i obciążenia są zwykle złożone i, jako występujące łącznie, relatywnie trudne do oceny. Wynika to głównie z konieczności prowadzenia analizy sprzężonej i uwzględnienia zmienności wielu czynników w czasie i temperaturze. Oddziaływanie obciążeń pionowych na konstrukcję murową wywołuje siły ściskające powodujące odształcenia w kierunku płaszczyzny ściany oraz przemieszczenie boczne (skurczenie).

Zmniejszenie przekroju poprzecznego ściany oraz jednocześnie występowanie w murze sił ściskających powoduje odształcenia zmieniające działanie siły z osiowej na mimośrodową, co w konsekwencji doprowadza do wcześniejszej utraty nośności w obrębie przekroju krytycznego (rysunek 4).

Wymienione procesy zachodzące wewnątrz konstrukcji murowych w warunkach pożaru, przede wszystkim rozszerzanie i kurczenie, powodują występowanie momentu zginającego. Przekroczenie granicznej wartości tego parametru może również powodować zniszczenie ściany.

Izolacyjność cieplna konstrukcji murowych

Wartość współczynnika przenikania ciepła ściany wielowarstwowej w warunkach stacjonarych może być wyznaczona z wzoru [1].

$$U = 1/(R_1 + \sum_{x=1}^n R_x + R_e) \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (1)$$

gdzie:
U – współczynnik przenikania ciepła [W/m²·K];



Rys. 4. Redukcja przekroju ściany w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury
 Fig. 4. Reduction of the wall cross-section resulting from exposition to high temperature

R_p, R_e – jednostkowe współczynniki przyjmowania ciepła [$m^2 \cdot K/W$];
 R_x – jednostkowy opór cieplny x-tej warstwy [$m^2 \cdot K/W$];
 n – liczba warstw.

W celu zapewnienia optymalnych parametrów termicznych ścian zewnętrznych, w tym również konstrukcji murowych, izolacje stosowane są na zewnętrznych powierzchniach ścian [9]. Pozwala to na odseparowanie warstwy nośnej przegrody od bezpośredniego wpływu otoczenia oraz optymalne wykorzystanie akumulacyjności cieplnej przegrody. W kontekście analizy procesu wymiany ciepła w konstrukcjach murowych, zastosowanie izolacji na zewnętrznej powierzchni przegrody może skutkować wzrostem średniej temperatury w przekroju poprzecznym. Wynika to z oczywistego faktu, że warstwa izolacji utrudnia przepływ ciepła od intensywnie ogrzewanej wewnętrznej powierzchni przegrody do otoczenia.

W przypadku konstrukcji murowych w warunkach pożaru proces wymiany ciepła jest realizowany na drodze promieniowania, konwekcji oraz przewodzenia. W celu uproszczenia, w obliczeniach analitycznych pominięta zostanie wymiana ciepła przez promieniowanie, które w warunkach pożaru stanowi ok. 25 – 30% całkowitej wymiany ciepła. Aby dobrze zobrazować istotę wpływu izolacji na rozkład temperatury wewnątrz konstrukcji murowej, szczegółowo opisany zostanie proces stacjonarnego ($\lambda = \text{const.}$) przewodzenia ciepła przez płaską ścianę warstwową. Ogólnie proces przewodzenia ciepła jest opisywany przez prawo Fouriera, które wiąże gęstość strumienia przewodzonego ciepła w określonym punkcie ciała z gradientem temperatury w tym punkcie.

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2)$$

gdzie:

q – jednostkowy strumień ciepła [W/m^2];
 λ – współczynnik przewodzenia ciepła zależny od rodzaju materiału i temperatury [$W/m \cdot K$];
 $\text{grad} T$ – gradient (różnica) temperatury [K/m].

W najprostszym przypadku, w warunkach stacjonarnego ($\lambda = \text{const.}$) przewodzenia ciepła przez ścianę płaską, równanie Fouriera przyjmuje postać:

$$q = -\lambda \cdot dT/dx \quad (3)$$

Stosując metodę rozdzielenia zmiennych oraz całkując równanie [3] stronami, otrzymujemy równanie [4] i [5] pozwalające na wyznaczenie jednostkowego strumienia ciepła przewodzonego przez ścianę płaską w warunkach stacjonarnych.

$$\int_{x_1}^{x_2} q \cdot dx = -\int_{T_1}^{T_2} \lambda \cdot dT \quad (4)$$

$$q = \lambda/\delta \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (5)$$

gdzie:

q – jednostkowy strumień ciepła przewodzonego przez ścianę [W/m^2];
 λ – współczynnik przewodzenia ciepła [$W/m \cdot K$];
 δ – grubość ściany przewodzącej ciepło [m];
 $T_{w1} - T_{w2}$ – różnica temperatury na powierzchniach ściany przewodzącej ciepło [K].

W przypadku ściany o powierzchni A , całkowity strumień ciepła przewodzonego przez ścianę można wyznaczyć ze wzoru [6].

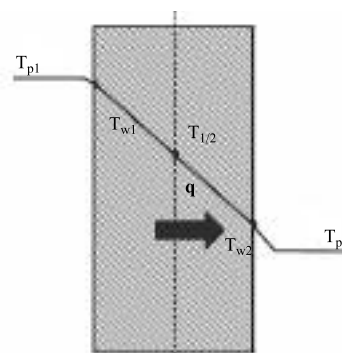
$$Q = A \cdot q \text{ [W]} \quad (6)$$

W przypadku stacjonarnego i ustalonego przewodzenia ciepła przez płaską ścianę warstwową, w celu wyznaczenia jednostkowego strumienia ciepła przewodzonego przez ścianę oraz rozkładu temperatury w jej przekroju poprzecznym konieczne jest wprowadzenie dodatkowego pojęcia zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła λ_z [$W/m \cdot K$]. Jego wartość zależy od wartości współczynników przewodzenia ciepła poszczególnych warstw, z których zbudowana jest ściana.

$$\lambda_z = \sum_{i=1}^n \delta_i / \sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i \text{ [W/m} \cdot K\text{]} \quad (7)$$

Wpływ izolacji termicznej, umieszczonej na zewnętrznej powierzchni, na rozkład temperatury w przekroju poprzecznym konstrukcji murowej od strony wewnętrznej, narażonej na działanie temperatury realnej w warunkach pożaru można określić, wykorzystując tabelaryczne zestawienie właściwości cieplnych typowych materiałów budowlanych, współczynników konwekcyjnego przyjmowania ciepła oraz wymienionych zależności analitycznych.

Przykładowy rozkład temperatury w przekroju poprzecznym ściany jednowarstwowej przedstawiono na rysunku 5, a ściany dwuwarstwowej z izolacją termiczną na rysunku 6. Ponadto przeprowadzono analizę porównawczą rozkładu temperatury w przekroju elementu murowego bez izolacji termicznej (rysunek 5) z przekrojem elementu murowego z zastosowaniem warstwy izolacji termicznej od strony nienagrzewanej, czyli niepoddanej oddziaływaniu pożaru (rysunek 6). Analizę wykonano zgodnie z metodyką oraz zależnościami podanymi w normach [1, 2].

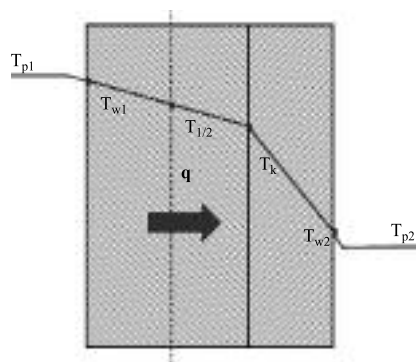


Rys. 5. Przykładowy rozkład temperatury w przekroju poprzecznym ściany jednowarstwowej

Fig. 5. Exemplary temperature distribution in the cross-section of the single layer wall

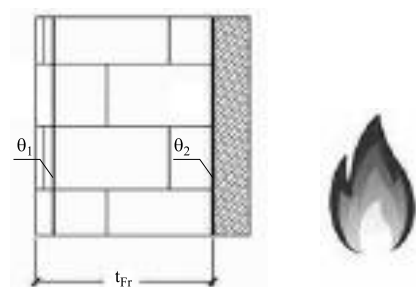
Za kryterium oceny uznano, zgodnie z uproszczoną metodą obliczeniową podaną w normie [2], osiągnięcie w polu przekroju elementu murowego poddanego jednostronnie oddziaływaniu wysokiej temperatury, temperatury określonej przez izotermy θ_1 i θ_2 przedstawione na rysunku 7.

Wartości izoterm określonych dla poszczególnych elementów murowych stanowią podstawę redukcji właściwości wytrzymałościowych tych elementów. W rozpatrywanym przypadku elementu murowego wartości izoterm wynoszą dla



Rys. 6. Przykładowy rozkłady temperatury w przekroju poprzecznym ściany dwuwarstwowej z izolacją termiczną

Fig. 6. Exemplary temperature distribution in the cross-section of the two layer wall with thermal insulation



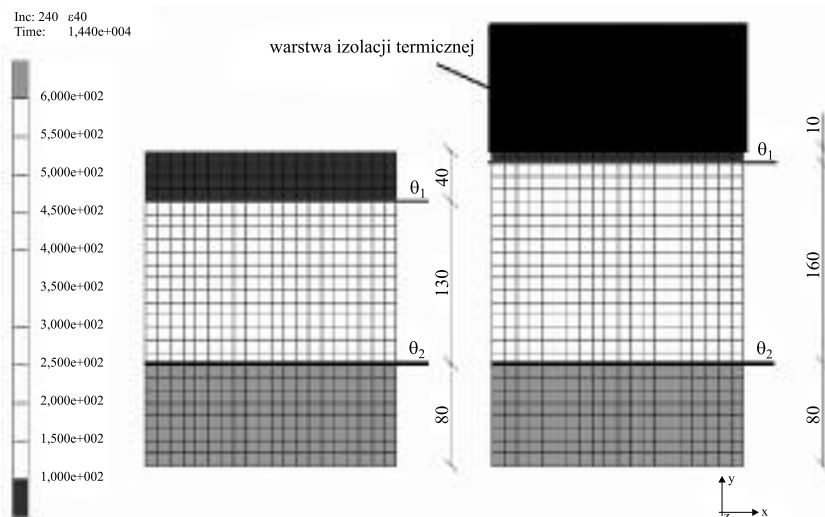
θ_1 – maksymalna temperatura, przy której można wykorzystywać wytrzymałość muru w warunkach normalnych [°C]
 θ_2 – temperatura, przy której wytrzymałość muru ulega zmniejszeniu [°C]
 t_{Fr} – grubość przekroju, w którym temperatura nie przekracza θ_2 [m]

Rys. 7. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym elementu murowego

Fig. 7. Temperature distribution in the cross-section of mortar structure

θ_1 100°C, a dla θ_2 600 °C. Pole przekroju elementu murowego w zależności od izolacji termicznej przy jednostronnym oddziaływaniu temperatury przez czas 240 min przedstawiono na rysunku 8.

Na podstawie otrzymanych wyników ustalono, że w przypadku zastosowania dodatkowej warstwy izolacji wartość temperatury w przekroju poprzecznym jest większa w porównaniu z temperaturą w elemencie murowym bez izolacji. Zasięg strefy określonej przez izotermę 100 °C w murze izolowanym w stosunku do nieizolowanego został przesunięty o 30 mm, a w przypadku izotermi 600 °C nie uległ przesunięciu. Część muru o temperaturze wyższej od temperatury określonej przez izotermę graniczną (θ_2) została odrzucona jako niepracująca (zniszczona przez temperaturę). Początkowa grubość elementu murowego wynosząca 250 mm w wyniku oddziaływania podwyższonej temperatury zmniejszyła się o 80 mm



Rys. 8. Pole temperatury w przekroju elementu murowego bez izolacji i z izolacją

Fig. 8. Thermal field in the cross-section of mortar structure without and with thermal insulation

(do izotermi θ_2 600 °C), a także wystąpiło przesunięcie izotermi θ_1 100 °C o 30 mm. Efekt ten wynika z braku możliwości oddawania ciepła do otoczenia przez powierzchnię nienagrzewaną, która jest zaizolowana termicznym materiałem o niskim współczynniku przewodności cieplnej i niewielkim ciepłe właściwym. Wraz ze zmniejszeniem przekroju poprzecznego elementu murowego zmniejszeniu ulega również jego nośność.

Podsumowanie

W artykule dokonano uproszczonej analizy w celu oceny wpływu zewnętrznej izolacji termicznej na właściwości mechaniczne konstrukcji murowej w umownych (znormalizowanych) warunkach pożaru. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zastosowanie ocieplenia nie wpływa na poprawę odporności ogniowej konstrukcji murowej, lecz powoduje obniżenie nośności ogniowej.

Izolacja stosowana w celu ograniczenia wartości współczynnika przenikania ciepła U i tym samym zmniejszenia strat ciepła działa w warunkach pożaru w sposób analogiczny jak podczas standardowej eksploatacji budynku i skutkuje wzrostem średniej temperatury w przekroju poprzecznym elementu murowego. Po określonym czasie nagrzewania elementy murowe osiągają temperaturę powodującą pogorszenie właściwości mechanicznych, co w konsekwencji prowadzi do redukcji nośności w części przekroju ściany. Zastosowanie dodatkowej warstwy ocieplenia (izolacji termicznej) wpływa na prze-

mieszczenie temperatury w przekrój ściany (przesunięcie się izotermi), zmniejszając przy tym „grubość efektywną” muru.

Wyniki otrzymane na podstawie obliczeń analitycznych potwierdzają wpływ zastosowania izolacji na zmniejszenie nośności analizowanego ocieplonego muru o ok. 4% w porównaniu z nieocieplonym. Efekt ten zależy od czasu nagrzewania (oddziaływania pożaru) i jest bardziej zauważalny przy dłuższej ekspozycji, gdyż w ocieplonym murze stała czasowa osiągnięta jest szybciej.

Literatura

- [1] PN-EN 1996-1-1:2010 Eurokod 6 – Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.
- [2] PN-EN 1996-1-2:2010 Eurokod 6 – Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
- [3] PN-EN 1363-1:2012 Badania odporności ogniowej – Część 1: Wymagania ogólne.
- [4] PN-EN 1364-1:2001 Badania odporności ogniowej elementów nienośnych – Część 1: Ściany.
- [5] PN-EN 1365-1:2013 Badania odporności ogniowej elementów nośnych – Część 1. Ściany.
- [6] Kosiorek M.; Łukowski M., „Odporność ogniowa ścian z wyrobów silikatowych” Ceramika Budowlana i Silikaty, 2002 r., nr 5, str. 2 – 20.
- [7] Konferencja naukowo-techniczna „Konstrukcje murowe. Harmonizacja polskich norm z normami europejskimi”, Puławy, 8-9 stycznia 1998 r.
- [8] Taler J., Duda P., Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła, WNT 2003.

Przyjęto do druku: 30.05.2015 r.