

Odształcalność muru pod wpływem wilgoci i temperatury

Dr inż. Roman Jarmontowicz, mgr inż. Jan Sieczkowski, Instytut Techniki Budowlanej

1. Wprowadzenie

W pracach projektowych niekiedy istotne mogą okazać się właściwości odształceniowe muru, spowodowane oddziaływaniem wilgoci i temperatury. W Eurokodzie 6 (EC6) – PN-EN 1996-1-1 [1], zagadnienia te ujęto w p. 3.7.4., gdzie m.in. zapisano, że „Współczynniki pęcznienia, rozszerzalność pod wpływem wilgoci lub skurcz i współczynnik liniowej odształcalności termicznej należy określać na podstawie badań”, a także, że przedziały zmian wartości właściwości odształceniowych muru podano w tablicy (tab. 1).

Podane w tabeli 1 wartości występują – dla wszystkich murów – w dość szerokich przedziałach, natomiast brak jest jakichkolwiek wskazówek ustalania ich wartości. W niniejszym artykule omówiono zagadnienia odształcalności muru pod wpływem wilgoci i temperatury oraz podano propozycje zasad przyjmowania określonych wartości do celów praktycznych. Artykuł może stać się przyczynkiem do podjęcia dyskusji i głębszych analiz zmierzających do uzupełnienia Załącznika krajowego do polskiej wersji Eurokodu 6.

2. Właściwości odształceniowe muru pod wpływem wilgoci

Z tabeli 1 wynika, że rozszerzalność występuje tylko w murach z elementów ceramicznych (wartości największe),

Tabela 1. Przedziały zmian wartości współczynnika pęcznienia, rozszerzalności pod wpływem wilgoci lub skurczu i współczynnika liniowej odształcalności termicznej

Rodzaj elementów murowych	Końcowa wartość współczynnika pęcznienia ^a ϕ_{∞}	Rozszerzalność pod wpływem wilgoci lub skurcz ^b mm/m	Współczynnik liniowej odształcalności termicznej, $\alpha_t, 10^{-6}/K$
Ceramika	0,5 do 1,5	-0,2 do +1,0	4 do 8
Silikaty	1,0 do 2,0	-0,4 do -0,1	7 do 11
Beton kruszywowy i kamień sztuczny	1,0 do 2,0	-0,6 do -0,1	6 do 12
Beton na kruszywach lekkich	1,0 do 3,0	-1,0 do -0,2	6 do 12
Autoklawizowany beton komórkowy	0,5 do 1,5	-0,4 do +0,2	7 do 9
Kamień naturalny	Magmowy	c	5 do 9
	Osadowy		2 do 7
	Metamorficzny		1 do 18

^a Końcowy współczynnik pęcznienia $\phi_{\infty} = \epsilon_{cz}/\epsilon_{el}$, gdzie ϵ_{cz} jest końcową wartością odształceń pęcznienia przy $\epsilon_{el} = \sigma/E$.

^b Ujemna wartość rozszerzalności pod wpływem wilgoci lub skurczu oznacza skracanie, natomiast wartość dodatnia oznacza rozszerzanie.

^c Wartości te są zazwyczaj bardzo małe.

z autoklawizowanego betonu komórkowego (wartości najmniejsze) i z kamienia naturalnego.

Skurcz murów z różnych elementów murowych także jest zróżnicowany. Największe wartości odształceń skurczowych występują w murach z elementów murowych betonowych, w szczególności z betonów kruszywowych na kruszywach lekkich, a najmniejsze – w murach z elementów ceramicznych.

Mury z ceramicznych elementów murowych

• Pęcznienie czerepu ceramicznego pod wpływem wilgoci

Wraz z wprowadzaniem do produkcji coraz większych elementów murowych, o objętości znacznie przekraczającej objętość jednej cegły oraz stosowaniem zapraw murarskich o większej wytrzymałości, zjawisko pęcznienia czerepu ceramicznego pod wpływem wilgoci zaczęło nabierać większego znaczenia. Problematyka ta była szerzej omówiona w publikacji [2], gdzie zaprezentowano wyniki badań wykonanych we Francji, Niemczech i w Polsce.

We Francji badano narastanie pęcznienia czerepu ceramicznego pod wpływem wilgoci w warunkach naturalnych – wilgoć była absorbowana z otaczającego powietrza. Badania prowadzono przez cztery lata [3]. W celu przyspieszenia badań próbki były gotowane w wodzie przez 30 godzin. Jako dopuszczalną wartość pęcznienia czerepu (po 30 godz. gotowania w wodzie) zalecano we Francji przyjmowanie wartości 0,3 mm/m.

Badania niemieckie [4] były wykonywane w komorze klimatycznej w temperaturze 20°C i wilgotności względnej powietrza 80%. W takich warunkach próbki były badane przez 60 dni, a niektóre przez 90 dni. Uzyskano wartości pęcznienia czerepu ceramicznego pod wpływem wilgoci zmieniające się do 0,2 mm/m do 0,65 mm/m. Na podstawie badań wyrobów pochodzących z różnych rejonów Niemiec opracowano kryteria oceny wrażliwości czerepu ceramicznego na pęcznienie pod wpływem wilgoci, jak podano w tabeli 2.

W Polsce problematyką pęcznienia czerepu ceramicznego pod wpływem wilgoci praktycznie nikt się nie zajmował [2]. W latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku wykonano pierwsze badania pęcznienia czerepu w pustakach ceramicznych ściennych pochodzących z trzech zakładów. Uzyskano wartości odkształceń wahające się od 0,27 do 0,37 mm/m.

Współczesne ceramiczne elementy murowe powinny spełniać wymagania normy PN-EN 771-1 [5]. Wymaganie w zakresie rozszerzalności pod wpływem wilgoci odnosi się tylko do ceramicznych elementów murowych poziomo drążonych, przeznaczonych do tynkowania, które mają co najmniej jeden wymiar równy 400 mm lub większy oraz grubość ścianek zewnętrznych mniejszą niż 12 mm. Wartość rozszerzalności ustalana jest na podstawie badań według PN-EN 772-19 [6], uwzględniając przepisy obowiązujące w miejscu zastosowania tych elementów.

Taki zapis wymagań budzi pewne wątpliwości, gdyż rozszerzalność czerepu w ceramicznych elementach murowych pod wpływem wilgoci powinna zależeć wyłącznie od wielkości tych elementów i warunków środowiskowych, w których elementy te będą się znajdowały po wbudowaniu. Również brak jest uzasadnienia ograniczenia wymagań w tym zakresie tylko do elementów poziomo drążonych o grubości ścianek zewnętrznych mniejszej niż 12 mm. Dodatkowo należy zauważyć, że tynkowanie ścian nie ma istotnego wpływu na powstawanie uszkodzeń spowodowanych rozszerzalnością pod wpływem wilgoci. Uszkodzenia takie powstają zarówno w ścianach tynkowanych, jak i nie tynkowanych.

W normie [6] nie podano zaleceń praktycznych dotyczących wymiarów granicznych dla określonej rozszerzalności czerepu pod wpływem wilgoci, przy których nie powstaną uszkodzenia muru. Autorzy proponują w tym zakresie ograniczenie wartości rozszerzalności czerepu do 0,3 mm/m. Wymaganie to, jak wynika z analizy skutków, jakie taka rozszerzalność może wywołać w murze, powinno dotyczyć elementów, których co najmniej jeden wymiar wynosiłby 360 mm lub więcej. Dla tych przypadków producenci powinni deklarować wartość rozszerzalności pod wpływem wilgoci.

Odształcenia czerepu są kumulowane przede wszystkim w spoinach, które mogą być wypełnione zaprawą lub elementy murowe mogą być ułożone „na suchy styk”.

Tabela 2. Kryteria oceny pęcznienia czerepu ceramicznego pod wpływem wilgoci, badanego w komorze klimatycznej

Odształcenie mm/m	Wrażliwość na działanie wilgoci
0,000–0,05 0,051–0,10 0,101–0,20	Niewrażliwy lub prawie niewrażliwy Bardzo mało wrażliwy Mało wrażliwy
0,201–0,30 0,301–0,40 0,401–0,50	Umiarkowanie wrażliwy Więcej niż średnio wrażliwy Dość wrażliwy
0,501–0,60 powyżej 0,60	Wysoko wrażliwy Bardzo wrażliwy

Czerep elementów murowych jest znacznie sztywniejszy od zaprawy, dlatego w murach ze spoinami wypełnionymi zaprawą odształcenia elementów murowych spowodowane działaniem wilgoci są kumulowane w zaprawie. W przypadku spoin między elementami ułożonymi „na suchy styk” przeważnie występuje szczelina powietrzna grubości 0,5 do 2 mm. Bywają jednak przypadki, gdy elementy murowe przylegają do siebie. Przy dużych wymiarach elementów murowych i nadmiernej rozszerzalności spowodowanej działaniem wilgoci w obydwu przypadkach mogą pojawiać się uszkodzenia. Inaczej zachowuje się mur wykonany z małych ceramicznych elementów murowych odształcenia elementów murowych kumulowane są w spoinach rozmieszczonych w niewielkich odległościach, nie powodując uszkodzeń.

• *Metody badania rozszerzalności czerepu ceramicznego pod wpływem wilgoci*

Metoda badania podana jest w PN-EN 772-19 [6] z tym, że zakres stosowania normy – jak już podano wyżej – ograniczony jest tylko do ceramicznych elementów murowych poziomo drążonych, w których co najmniej jeden wymiar jest nie mniejszy niż 400 mm, a grubość ścianek jest mniejsza niż 12 mm. Normy nie należy więc stosować do innych ceramicznych elementów murowych. Zdarzają się jednak przypadki wykonywania badania elementów murowych o wymiarach wykraczających poza zakres normy [6], według zaleceń PN-EN 772-14 [7], dotyczącej elementów murowych z betonu kruszywowego i kamienia sztucznego. W takim przypadku wyniki badań są niemiernodajne, ponieważ różnice w metodach badawczych wg [6] i [7] są bardzo duże (całkowicie odmienny sposób przygotowania próbek do badania oraz odmienne warunki wykonania samego badania).

Metoda badania właściwości odształceniowych powinna uwzględniać zjawiska fizykochemiczne zachodzące zarówno w czasie produkcji elementów, jak i w okresie późniejszym, związanym z ich przechowywaniem, wbudowywaniem i po wbudowaniu. Poznanie tych zjawisk umożliwi opracowanie właściwej metody badania właściwości odształceniowych. Opisy zjawisk fizykochemicznych zachodzących w ceramicznych elementach

murowych można znaleźć w literaturze technicznej, np. [2], gdzie również skrótowo opisano charakterystyczne punkty zachodzących procesów i które przedstawiono poniżej.

Formowanie ceramicznych elementów murowych odbywa się przy użyciu mas o dużej zawartości – 18–22% (niezbędna do uzyskania przez surowiec właściwości plastycznych) umożliwiającej nadawanie elementom murowym odpowiedniego kształtu.

Elementy murowe po ich uformowaniu poddawane są procesowi suszenia. W tym procesie większość wody w masie ceramicznej zostaje usunięta, a sama masa kurczy się zwykle o 5–9% wymiaru liniowego wyrobu. Pod koniec suszenia masa ceramiczna traci plastyczność i staje się materiałem sprężysto-plastycznym. Na tym etapie produkcji wytrzymałość wysuszonej masy ceramicznej jest jeszcze bardzo mała.

Kolejnym procesem w produkcji ceramicznych elementów murowych jest wypalanie. Proces ten polega na stopniowym podnoszeniu temperatury, w czasie którego następuje odparowanie niewielkiej ilości wody nie usuniętej w procesie suszenia. Gdy temperatura osiągnie 400–600°C, wtedy zostanie usunięta woda chemicznie związana. Zjawisku temu towarzyszy dalszy skurcz. Po podniesieniu temperatury do około 900°C w masie wyrobu zaczynają się tworzyć nowe minerały wskutek wiązania się minerałów stanowiących wyjściowy skład masy ceramicznej. W temperaturze około 1000°C następuje częściowe topienie powodujące zmniejszenie liczby małych porów. Temperaturę wypalania dobiera się w zależności od składu masy ceramicznej (surowca podstawowego i dodatków technologicznych), zwykle nie przekracza ona 1050–1150°C.

W procesie wypalania następuje całkowite usunięcie wody, nawet chemicznie związanej. Cząsteczki czerepu przybliżają się do siebie, powodując skurcz elementów murowych. Stan taki nie jest trwały i czerep ceramiczny dąży do osiągnięcia stanu równowagi z otaczającym go środowiskiem. Następuje absorpcja wilgoci, która ponownie wiąże się chemicznie. Proces ten powoduje zwiększanie objętości czerepu ceramicznego. Rozszerzalność ta ma inny mechanizm niż rozszerzalność w elementach murowych wytwarzanych na bazie spoiw. Proces zwiększania objętości czerepu ceramicznego pod wpływem wilgoci i jej wydalania w temperaturach 400–600°C jest procesem odwracalnym i może być powtórzony dowolną liczbą razy; w normalnych warunkach, tj. w temperaturze 30–60°C jest on nieodwracalny.

Opisane wyżej szczególne właściwości ceramicznych elementów murowych jednoznacznie wskazują, że niemożliwe jest korzystanie z innych metod badawczych właściwości odkształceniowych. Dotyczy to zarówno sposobu przygotowania próbek, jak i wykonania właściwego badania.

Ze względów formalnych nie można korzystać z normy PN-EN 772-19 [6], dlatego najlepszym rozwiązaniem byłoby opracowanie normy krajowej (PN-B) dla dużych

ceramicznych elementów murowych innych niż objęte zakresem normy PN-EN 772-19 [6].

• *Skurcz murów wykonanych z ceramicznych elementów murowych*

Skurcz murów jest przede wszystkim spowodowany skurczem zaprawy murarskiej. Wartości skurczu, jeżeli występuje, są bardzo małe. W PN-EN 1996-1-1 [1] maksymalną wartość skurczu określono na –0,2 mm/m. Tak małego skurczu nie notuje się w murach wykonanych z innych elementów murowych niż ceramiczne. W murach z ceramicznych elementów murowych skurcz może wystąpić tylko w przypadku zastosowania elementów o małej objętości (np. cegły ceramicznej pełnej, dziurawki lub kratówki); natomiast w murach z większych elementów murowych skurcz z reguły nie występuje.

Mury z silikatowych elementów murowych

Silikatowe elementy murowe produkowane są z mieszanki piasku o dużej zawartości kwarcu i wapna, przez prasowanie pod dużym ciśnieniem i autoklawizację. W procesach tych tworzą się krzemiany wapnia, które decydują o właściwościach wyrobów. Zgodnie z PN-EN 1996-1-1 [1] w murach wykonanych z silikatowych elementów murowych może występować jedynie skurcz (nie występuje pęcznienie) o wartości od –0,4 mm/m do –0,1 mm/m, z tym, że brak jest jakichkolwiek informacji co do sposobu przyjmowania ich dla rozpatrywanych konstrukcji murowych.

Silikatowe elementy murowe dzięki autoklawizacji po uprzednim sprasowaniu pod dużym ciśnieniem są mniej podatne na działanie wilgoci lub wody, dlatego działanie wilgoci nie powoduje rozszerzalności tworzywa silikatowego. Mogą powstawać jedynie niewielkie odkształcenia skurczowe wskutek wysychania elementów. Jeżeli mury są wykonane z elementów silikatowych o małych wymiarach, to będą zawierać znaczące ilości zaprawy, która może wpływać na zwiększenie odkształceń skurczowych całego muru. Biorąc pod uwagę, że zaprawa w murach z silikatowych elementów murowych może stanowić od 0,02 do 0,30 objętości muru, można zaproponować następujący wzór umożliwiający oszacowanie wielkości skurczu takiego muru, w mm/m:

$$s = -1,07 \frac{V_z}{V_{em}} - 0,08$$

gdzie:

s – skurcz muru z silikatowych elementów murowych, mm/m,

V_z – objętość zaprawy,

V_{em} – objętość elementów murowych.

Można więc domniemywać, że największy skurcz będzie występował w murach z elementów murowych silikatowych o najmniejszej objętości, a najmniejszy – w murach z elementów murowych bardzo dużych.

Mury z betonowych elementów murowych (z betonów kruszywowych zwykłych i lekkich) oraz z kamienia sztucznego

Kamień sztuczny jest wg EC6 betonem kruszywowym o specjalnie dobieranym kruszywie i technologii wytwarzania i dlatego właściwości murów z tych elementów będą rozpatrywane łącznie.

Wartości skurczu podane w [1] wahają się w szerokich przedziałach:

- dla betonu zwykłego i kamienia sztucznego od -0,1 mm/m do -0,6 mm/m,
- dla betonu lekkiego od -0,2 mm/m do -1,0 mm/m.

Podobnie jak dla innych konstrukcji murowych nie podano, w jakich warunkach należy przyjmować odpowiednie wartości.

Skurcz betonu szerzej omówiony jest w normie PN-EN 1992-1-1 [8] oraz w literaturze, np. [12]. W przypadku elementów murowych z betonu kruszywowego i kamienia sztucznego rozróżnia się skurcz powstający wskutek wysychania (ϵ_{cd}) oraz skurcz autogeniczny, powstający w czasie twardnienia betonu (ϵ_{ca}), można przyjąć, że skurcz autogeniczny jest zakończony w momencie wysyiki elementów murowych do odbiorcy. Istotne znaczenie dla pracy konstrukcji murowej ma skurcz powstający wskutek wysychania (ϵ_{cd}). Według [8] końcową wartość skurczu spowodowanego wysychaniem należy obliczać ze wzoru:

$$\epsilon_{cd, \infty} = k_h \epsilon_{cd, 0}$$

w którym:

$\epsilon_{cd, \infty}$ – końcowa wartość skurczu spowodowanego wysychaniem

k_h – współczynnik zależny od miarodajnego wymiaru $h_0 = \frac{2A_c}{u}$,

$\epsilon_{cd, 0}$ – wartość średnia skurczu, przyjmowana z tabeli 3,

A_c – pole przekroju betonu,
 u – obwód części przekroju wystawionej na wysychanie.

Dla elementów murowych z betonu kruszywowego i kamienia sztucznego można przyjąć, że wartość współczynnika k_h jest równa 1. Zatem $\epsilon_{cd, \infty} = \epsilon_{cd, 0}$.

Klasa betonu kruszywowego stosowanego do produkcji elementów murowych nie przekracza zwykle C20/25, a elementów murowych z kamienia sztucznego C40/50. Wilgotność względna powietrza otaczającego mur można przyjąć w granicach 40–90%, a wartości skurczu wg tabeli 3 [8].

Tabela 3. Wartości skurczu elementów murowych z betonu kruszywowego i z kamienia sztucznego

Klasa betonu	Wilgotność względna otaczającego powietrza (w%)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00

Dokładna metoda obliczania skurczu betonu spowodowanego wysychaniem jest podana w Załączniku B normy PN-EN 1992-1-1 [8]. W przypadku kruszywowego betonu lekkiego, zgodnie z [8], końcowe wartości skurczu spowodowanego wysychaniem można przyjmować jak dla betonu zwykłego, mnożąc je przez współczynnik η_3 o następujących wartościach:

- $\eta_3 = 1,5$ dla klas nie wyższych niż LC16/18,
- $\eta_3 = 1,2$ dla klasy LC20/22 i klas wyższych.

Metoda badania skurczu betonowych elementów murowych podana w normie PN-EN 772-14 [7] jest powołana w normie wyrobu i nie budzi żadnych zastrzeżeń.

Mury z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego

Zgodnie z PN-EN 1996-1-1 [1] mury z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego mogą ulegać zarówno skurczowi, jak i pęcznieniu, a graniczne wartości tych odkształceń zostały ocenione na:

- przy skurczu -0,4 mm/m,
- przy rozszerzalności +0,2 mm/m.

Maksymalna wartość rozszerzalności pod wpływem wilgoci nie stwarza sytuacji niebezpiecznych, tj. groźących powstawaniem rys lub spękań, natomiast skurcz może budzić pewne zastrzeżenia. Skurcz jest badany zgodnie z PN-EN 680 [9] przy zmianie wilgotności od 30% do 6%, czyli od wilgotności magazynowo-wysyłkowej do wilgotności ustabilizowanej w konstrukcjach murowych, w warunkach eksploatacji obiektów. W [10] przedstawiono wyniki badań skurczu metodą normową, wykonane w latach 2010–2012, które mieściły się w granicach od -0,01 mm/m do -0,44 mm/m. Zapisano tam również, że przewiduje się nowelizację PN-EN 680 [9] przyjęcie klas skurczu, od klasy najniższej – przy skurczu -0,15 mm/m do klasy najwyższej – przy skurczu -0,40 mm/m. Natomiast nie podano maksymalnej wartości skurczu murów wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego, który można dopuścić bez narażenia konstrukcji murowych na możliwość powstania uszkodzeń. Można jedynie domniemywać, że taką wartością będzie skurcz o wartości nie większej niż -0,4 mm/m, bo taka wartość występuje w PN-EN 1996-1-1 [1] jako wartość graniczna. Porównując tę wartość z wymaganiami poprzedniej normy krajowej PN-B-06258 [11], należy stwierdzić, że obecne wymagania są ostrzejsze, ponieważ w normie krajowej dopuszczano następujące wartości skurczu:

- -0,5 mm/m dla betonu komórkowego na kruszywie piaskowym,
- -0,75 mm/m dla betonu popiołowego.

Podana w EC6 wartość skurczu konstrukcji murowych z elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego -0,4 mm/m może być uznana jako dostatecznie zapobiegająca przed uszkodzeniami.



Fot. 1. Przykład różnorodności kamienia naturalnego w jednym murze (fot. R. Jarmontowicz)

Mury z kamienia naturalnego

W murach z kamienia naturalnego mogą wystąpić, wg PN-EN 1996-1-1 [1], zarówno zjawiska rozszerzalności jak i skurczu spowodowanego oddziaływaniem wilgoci; odkształcenia mogą być zawarte w granicach od $-0,4$ mm/m do $+0,7$ mm/m. Z doświadczenia wiadomo, że rodzaj i wielkość odkształceń murów zależy od sposobu układania elementów w murze, rodzaju kamienia, zaprawy murarskiej i jej udziału w objętości muru, wiązania elementów murowych w murze oraz wilgotności elementów murowych w czasie murowania. W przypadku murów z bardzo zróżnicowanych elementów murowych z kamienia naturalnego (fot. 1) trudno jest ustalić wartości odkształceń muru.

W murach jednorodnych pod względem rodzaju skały i rodzaju elementów murowych dane na temat odkształceń spowodowanych działaniem wilgoci powinien dostarczać producent elementów murowych lub ich dystrybutor.

3. Właściwości odkształceniowe muru pod wpływem zmian temperatury

Wartości odkształceń muru pod wpływem zmian temperatury, podane w normie PN-EN 1996-1-1 [1] dla murów wykonanych z różnych elementów murowych zawarte są w przedziałach, z reguły o znacznej rozpiętości. Największa rozpiętość odkształceń występuje dla murów z kamienia naturalnego metamorficznego $1-18 \cdot 10^{-6}/K$, a najmniejsza – dla murów z autoklawizowanego betonu komórkowego $7-9 \cdot 10^{-6}/K$. Nie podano jednak, w jakich przypadkach należy przyjmować poszczególne wartości. Poniżej przedstawiono propozycje zasad korzystania z zapisów normowych przy ustalaniu wartości odkształceń murów pod wpływem zmian temperatury.

Zagadnienia te są istotne przede wszystkim ze względu na potrzebę ustalenia rozstawu dylatacji w konstrukcjach murowych. Należy przy tym uwzględnić także inne właściwości odkształceniowe tych konstrukcji.

Mury z elementów murowych ceramicznych

W starszych opracowaniach, np. w publikacji [13], dla murów z ceramicznych elementów murowych zwykle podawana była jedna wartość współczynnika odkształcalności muru pod wpływem zmian temperatury, przeważnie $5 \cdot 10^{-6}/K$ – dla murów z cegły ceramicznej pełnej i $6 \cdot 10^{-6}/K$ – dla murów z pustaków ceramicznych.

Biorąc pod uwagę, że decydującą rolę odgrywa rodzaj czerepu ceramicznego i jego właściwości oraz podany w PN-EN 1996-1-1 [1] zakres wartości analizowanego współczynnika, proponuje się przyjąć następujące jego wartości:

- mury z cegły klinkierowej – $8 \cdot 10^{-6}/K$,
- mury z cegły elewacyjnej – $7 \cdot 10^{-6}/K$,
- mury z elementów z czerepem nieporyzowanym – $6 \cdot 10^{-6}/K$,
- mury z elementów o objętości drążeń $\geq 40\%$ z czerepem poryzowanym – $5 \cdot 10^{-6}/K$,
- mury z elementów o objętości drążeń $< 40\%$ z czerepem poryzowanym – $4 \cdot 10^{-6}/K$.

Mury z elementów murowych silikatowych

W starszych opracowaniach, np. w publikacji [13], wartość współczynnika odkształcalności muru pod wpływem zmian temperatury przyjmowano jako $10 \cdot 10^{-6}/K$. Stosowana wówczas technologia wytwarzania elementów silikatowych nie pozwalała na uzyskiwanie gęstości netto tych wyrobów poniżej 2000 kg/m³, co wpłynęło na przyjętą wartość współczynnika.

W PN-EN 1996-1-1 [1] wartości współczynnika zawierają się w dość wąskim przedziale, tj. w granicach od $7 \cdot 10^{-6}/K$ do $11 \cdot 10^{-6}/K$.

Wartości rozpatrywanych odkształceń zależą przede wszystkim od gęstości netto elementów murowych, czyli od gęstości samego tworzywa silikatowego. Do celów praktycznych proponuje się przyjmować następujące wartości tego współczynnika:

- przy gęstości elementów murowych netto ≤ 1800 kg/m³ – $7 \cdot 10^{-6}/K$,
- przy gęstości elementów murowych netto ≤ 1900 kg/m³ – $8 \cdot 10^{-6}/K$,
- przy gęstości elementów murowych netto ≤ 2000 kg/m³ – $9 \cdot 10^{-6}/K$,
- przy gęstości elementów murowych netto ≤ 2100 kg/m³ – $10 \cdot 10^{-6}/K$,
- przy gęstości elementów murowych netto ≥ 2200 kg/m³ – $11 \cdot 10^{-6}/K$.

Mury z elementów murowych betonowych (z betonów kruszywowych zwykłych i lekkich) oraz z kamienia sztucznego

W normie PN-EN 1996-1-1 [1] dla wszystkich

wymienionych murów podano jednakowy przedział zmian wartości współczynnika odkształcalności termicznej – od $6 \cdot 10^{-6}/K$ do $12 \cdot 10^{-6}/K$. Wspólny przedział wartości odkształceń muru z elementów murowych z betonu zwykłego, kamienia sztucznego i betonu kruszywowego lekkiego należy uznać za niewłaściwe. W PN-EN 1992-1-1 [8] przyjęto stałą wartość tego współczynnika tylko dla betonu zwykłego równą $10 \cdot 10^{-6}/K$, natomiast dla betonu kruszywowego lekkiego – zależnie od rodzaju kruszywa od $4 \cdot 10^{-6}/K$ do $14 \cdot 10^{-6}/K$. Zakres tych odkształceń jest większy niż konstrukcji murowych z elementów murowych z betonu kruszywowego lekkiego. Nie podano jednak, jakie wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej należy przyjmować przy różnych kruszywach; zalecono jedynie, aby dla tych betonów przyjmować wartość $8 \cdot 10^{-6}/K$.

Dla konstrukcji murowych z elementów murowych z betonu zwykłego zaleca się przyjmować wartość $10 \cdot 10^{-6}/K$ (jak dla konstrukcji betonowych), dla murów z kamienia sztucznego $12 \cdot 10^{-6}/K$, a dla murów z elementów murowych z betonu kruszywowego lekkiego $8 \cdot 10^{-6}/K$. Zaproponowane wartości są wartościami uśrednionymi. Odchylenia od tych wartości, jakie mogą wystąpić w praktyce, będą niewielkie i mało istotne.

Mury z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego

W starszych publikacjach [14] wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej przyjmowano jako $10 \cdot 10^{-6}/K$. Natomiast według EC6 mury te charakteryzują się najmniejszą różnicą wartości granicznych współczynnika rozszerzalności cieplnej. W rzeczywistości wartości tego współczynnika zależą głównie od wytrzymałości na ściskanie betonu komórkowego. Do praktycznych zastosowań zaleca się przyjmować następujące wartości:

- przy wytrzymałości 1,5; 2,0; 3,0 MPa – $7 \cdot 10^{-6}/K$,
- przy wytrzymałości 4,0 i 5,0 MPa – $8 \cdot 10^{-6}/K$,
- przy wytrzymałości 6,0 i 7,0 MPa – $9 \cdot 10^{-6}/K$.

Mury z elementów murowych z kamienia naturalnego

Dotychczas dla murów z kamienia naturalnego przyjmowano jedną wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej o wartości $8 \cdot 10^{-6}/K$ [15], z wyjątkiem murów z elementów murowych z piaskowca, dla których podano wartość $13 \cdot 10^{-6}/K$.

Wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej zostały w PN-EN 1996-1-1 [1] uzależniono od rodzaju (pochodzenia) kamienia naturalnego. Wyróżniono trzy grupy kamieni naturalnych, dla których określono wartości tego współczynnika:

- magmowe – $(5-9) \cdot 10^{-6}/K$,
- osadowe – $(2-7) \cdot 10^{-6}/K$,
- metamorficzne – $(1-11) \cdot 10^{-6}/K$.

Wobec braku szczegółowych informacji na temat wpływu różnych czynników na odkształcalność termiczną murów z kamienia naturalnego, w przypadkach istotnych

dla celów projektowania, należy zwrócić się do producenta lub dostawcy elementów murowych, aby dostarczył odpowiednie informacje w tym zakresie.

4. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono propozycje uzupełnienia normy PN-EN 1996-1-1 [1], a ściślej Załącznika krajowego do tej normy, w zakresie odkształcalności murów pod wpływem wilgoci i temperatury. Propozycje te umożliwiają ustalenie wartości odkształceń muru w określonych warunkach, pomocnych w pracach projektowych lub analizach konstrukcji murowych. Z uwagi na brak wiarygodnych wyników badań propozycje nie dotyczą murów z kamienia naturalnego. W pozostałych przypadkach, tzn. murów z elementów murowych ceramicznych, silikatowych, betonowych (z betonu kruszywowego zwykłego i lekkiego), z kamienia sztucznego i z autoklawizowanego betonu komórkowego podane wartości należy traktować jako propozycję do dyskusji podczas nowelizacji Załącznika krajowego do EC6.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1996-1-1 Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych
- [2] Jarmontowicz R., Wybrane zagadnienia technologiczne i wytrzymałościowe ściennych prefabrykatów ceramiczno-betonowych. COIB, Warszawa, 1982
- [3] Siestrunk R., Lamer P., Huet C., Alviset L., Action de L humidite sur la ceramique dans le cadre de L Association Beton-Ceramique. Communication CTTB 1965
- [4] Schellbach G., Schmidt H., Einfluß des Rohmaterials und der Produktionstechnik auf das Verformungsverhalten von Ziegeln-Auswirkungen dieser Verformungen aufB aukonstruktionen. Ziegelindustrie nr 10/1980
- [5] PN-EN 771-1 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 1: Elementy murowe ceramiczne
- [6] PN-EN 772-19 Metody badań elementów murowych. Część 19: Określenie rozszerzalności pod wpływem wilgoci dużych, poziomo drażonych elementów murowych ceramicznych
- [7] PN-EN 772-14 Metody badań elementów murowych. Część 14: Określenie zmian liniowych pod wpływem wilgoci elementów murowych z betonu kruszywowego i kamienia sztucznego
- [8] PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [9] PN-EN 680 Oznaczenie skurczu przy wysychaniu autoklawizowanego betonu komórkowego
- [10] Zapotoczna-Sytek G., Balkovic S., Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia, właściwości, zastosowanie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013
- [11] PN-B-06258:1989 Autoklawizowany beton komórkowy
- [12] Lewicki B. i inni, Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Komentarz do PN-B-03264:2002, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2005 r.
- [13] Pierzchlewicz J., Jarmontowicz R., Budynki murowane. Materiały i konstrukcje, Arkady, Warszawa 1993
- [14] Janicki S., Sikorski J., Wymiarowanie konstrukcji murowych i zespolonych, Arkady, Warszawa 1974
- [15] PN-87/B-03002 Konstrukcje murowe. Obliczenia statyczne i projektowanie