

# ANALIZA DYNAMICZNYCH CHARAKTERYSTYK CIEPLNYCH BETONOWYCH PRZEGRÓD JEDNOWARSTWOWYCH

H. Garbalińska, J. Strzałkowski

Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, Polska

## STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono ocenę wpływu parametrów cieplnych wybranych kompozytów betonowych na dynamiczne charakterystyki cieplne wykonanych z nich przegród jednowarstwowych. Analizę przeprowadzono w odniesieniu do grupy czternastu betonów różnego rodzaju.

## WPROWADZENIE

Stale podnoszone wymagania w odniesieniu do efektywności energetycznej budynków wyznaczają współczesne trendy rozwojowe w dziedzinie budownictwa. Główna uwaga skupia się na udoskonalaniu technologii związanych z materiałami termoizolacyjnymi wykorzystywanymi do docieplania przegród zewnętrznych. Wiąże się to z coraz bardziej restrykcyjnie ustalonymi poziomami maksymalnych dopuszczalnych wartości współczynników przenikania ciepła  $U$  poszczególnych przegród. W stale zaostrzanych przepisach uznawany jest on za podstawowy parametr decydujący o jakości cieplnej komponentów budowlanych. Jednakże obok konieczności zapewnienia odpowiedniej izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych, należy współcześnie również zadbać o ich właściwą pojemność cieplną, która istotnie wpływa na straty energii, zakumulowanej w poszczególnych warstwach różnie ukształtowanych przegród. Największą rolę w tym względzie spełnia warstwa konstrukcyjna, z racji funkcji charakteryzująca się z reguły największą akumulacyjnością.

W pracy (Garbalińska, Strzałkowski, 2012) przeanalizowano ten problem w odniesieniu do czternastu dwuwarstwowych ścian zewnętrznych, w każdym przypadku izolowanych warstwą styropianu o grubości 12 cm. Zróżnicowanie przegród wynikało z przyjęcia na warstwę konstrukcyjną o grubości 18 cm różnego rodzaju betonów. W grupie testowanych kompozytów betonowych były zarówno betony zwykłe, jak i betony lekkie wykonane na bazie dwóch różnych kruszyw. Dodatkowo podstawowe receptury każdego z testowanych betonów poddane zostały działaniu domieszki napowietrzającej. Celem było znalezienie kompromisu między możliwie jak najlepszą izolacyjnością oraz akumulacyjnością cieplną. Niniejszy referat przytacza podstawowe informacje dotyczące badań laboratoryjnych, przeprowadzonych w odniesieniu do grupy testo-

wanych czternastu kompozytów, a następnie prezentuje obliczenia dotyczące ścian zewnętrznych z nich wykonanych. Tym razem ocenie poddane zostały dynamiczne charakterystyki cieplne przegród jednowarstwowych, przy zachowaniu tej samej co poprzednio grubości 18 cm.

## OPIS DYNAMICZNYCH CHARAKTERYSTYK CIEPLNYCH

Obliczenia oparto na algorytmie zapisanym w normie PN-EN ISO 13786 prezentującej charakterystyki i metody obliczeń związane z dynamicznym zachowaniem cieplnym komponentu budowlanego. Do wyznaczenia powierzchniowej pojemności cieplnej wykorzystano metodę macierzy przenoszenia ciepła. Znajduje ona zastosowanie do komponentów płaskich o warstwach jednorodnych. Przy czym głębokość okresowego wnikania fali ciepła materiału określa wzór:

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\pi \cdot \rho \cdot c}} \quad [\text{m}] \quad (1)$$

Uzyskiwane wartości zależą od badanego okresu wahań temperatury. Założono, że w rozpatrywanym okresie czasu wahań temperatury i strumienia ciepła oscylują wokół ich przeciętnych wartości długookresowych i opisane będą sinusoidalną funkcją czasu (PN-EN ISO 13786):

$$\Theta_n(t) = \overline{\Theta}_n + |\hat{\Theta}_n| \cos(\omega t + \psi) \quad [^\circ\text{C}] \quad (2)$$

$$\Phi_n(t) = \overline{\Phi}_n + |\hat{\Phi}_n| \cos(\omega t + \varphi) \quad [\text{W/m}] \quad (3)$$

Normowe obliczenia dynamicznych charakterystyk cieplnych prowadzone są w następującej kolejności:

- sporządzenie szczegółowych szkiców elementu wraz z wymiarami,
- określenie dla poszczególnych materiałów składowych wartości przewodności cieplnej  $\lambda$ , ciepła właściwego  $c$ , oraz gęstości  $\rho$ ,
- wyznaczenie okresu wahań na powierzchniach elementu,
- określenie głębokości wnikania fali ciepła warstwy pierwszej,

- określenie elementów przenoszenia ciepła dla każdej warstwy przegrody,
- pomnożenie macierzy przenoszenia ciepła dla warstw, łącznie z warstwami brzegowymi, we właściwej kolejności w celu otrzymania macierzy przenoszenia dla całej przegrody.

Elementy macierzy  $Z_{mn}$  oblicza się następująco:

$$Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi) \quad (4)$$

$$Z_{12} = -\frac{\delta}{2\lambda} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi)] \} \quad (5)$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi)] \} \quad (6)$$

przy czym  $\xi$  stanowi stosunek grubości warstwy do głębokości wnikania (PN-EN ISO 13786):

$$\xi = \frac{d}{\delta} \quad (7)$$

Powierzchniowe pojemności ciepłe (wewnętrzna oraz zewnętrzna) wyznacza się ze wzorów:

$$\kappa_1 = \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right| \left[ \frac{kJ}{m^2 K} \right] \quad (8)$$

$$\kappa_2 = \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right| \left[ \frac{kJ}{m^2 K} \right] \quad (9)$$

Stateczność cieplna przegrody scharakteryzowana jest przez dwa pojęcia: współczynnik tłumienia  $f$  oraz przesunięcie fazowe  $\eta$ . Tłumienie fali temperatury jest to stosunek modułu okresowej transmitancji cieplnej do transmitancji cieplnej w stanie ustalonym:

$$f = \frac{|Y_{12}|}{U} = \frac{A_{st}}{A_{se}} \quad (10)$$

Współczynnika tłumienia  $f$  zawiera się w granicach od zera do jedności, przy czym zero oznacza pełne tłumienie temperatury przez badany komponent w rozpatrywanym okresie czasu.

## BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badaniami objęto grupę czternastu mieszanek betonowych. Wykonano je na bazie trzech różnych kruszyw, przyjmując wyjściowe proporcje dotyczące receptur na bazie pracy (Domagała, 2010). Wszystkie testowane mieszanki betonowe miały ten sam wskaźnik wodno-cementowy  $w/c = 0,55$  oraz stały stosunek piasku ( $0 \div 2$  mm) do cementu  $p/c = 1,2$ . Do wykona-

nia poszczególnych mieszanek użyto tego samego cementu CEM I 42,5R. Jednakowa była również frakcja wprowadzonego kruszywa grubego ( $4 \div 8$  mm). Receptury zróżnicowane były natomiast jego rodzajem. Zdecydowano się na przetestowanie betonów wykonanych na kruszywie kamiennym (K0) oraz na dwóch rodzajach kruszyw lekkich (K1, K2). Szczegółowy opis receptur zamieszczono w (Strzałkowski, 2012).

Mając na względzie dużą nasiąkliwość kruszyw lekkich i jej znaczące oddziaływanie na urabialność oraz końcowe parametry otrzymywanego kompozytu, wykonano po trzy receptury, z kruszywem lekkim K1 oraz K2 dozowanym w różnym stanie zawilgocenia. Do mieszanek wprowadzono: kruszywo suche (K1/1, K2/1), kruszywo w stanie naturalnej wilgotności (K1/2, K2/2), kruszywo całkowicie nasycone wodą (K1/3, K2/3).

Dodatkowo w połowie receptur zdecydowano się na zastosowanie domieszki napowietrzającej. Jej zadaniem było rozrzedzenie matrycy cementowej w celu poprawy izolacyjności cieplnej testowanych kompozytów betonowych. Przekładało się to oczywiście równocześnie na zmianę akumulacyjności cieplnej, jak również wytrzymałości, będącej przedmiotem dalszych prac badawczych. Połowa wymienionych wyżej receptur nie zawierała domieszki napowietrzającej (typ „a”), natomiast druga połowa wykonana była z jej zastosowaniem w ilości 1,1% masy cementu (typ „b”). Zatem w grupie K0 testowano dwie receptury (z domieszką napowietrzającą oraz bez) wykonane na bazie wyłącznie kruszyw kamiennych, ale o takiej samej frakcji jak w K1 oraz K2. Przyjęcie takich receptur stworzyło możliwość porównania betonów lekkich z betonami zwykłymi. Możliwość bezpośrednich porównań dotyczyła receptur K1/3 oraz K2/3 czyli betonów, w których nasycone kruszywo nie było w stanie odciągać wody z zaczynu.

Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  oraz ciepła właściwego  $c$  próbek betonowych zrealizowano przy użyciu aparatu Isomet 2104. Wyposażony jest on w zestaw sond o różnym zakresie pomiarowym, dostosowanym do różnego rodzaju materiałów budowlanych. Pomiar jest bezinwazyjny i stosunkowo szybki. Umożliwia równoczesne wyznaczenie m. in. współczynnika przewodności cieplnej oraz ciepła właściwego badanego materiału. Średnie wartości tych parametrów uzyskane po 28 dniach dojrzewania poszczególnych betonów zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Dane nt. gęstości i parametrów cieplnych kompozytów betonowych po 28 dniach dojrzewania

Typ próbek	K0/3a	K1/1a	K1/1b	K1/2a	K1/2b	K1/3a	K1/3b
$\rho$ kg/dm <sup>3</sup>	2,35	1,42	1,12	1,31	0,87	1,3	0,85
$\lambda$ W/ (m <sup>2</sup> ·K)	1,98	0,68	0,46	0,64	0,21	0,59	0,2
$c_p$ MJ/ (m <sup>3</sup> ·K)	1,75	1,74	1,54	1,69	0,69	1,66	0,67

Typ próbek	K0/3b	K2/1a	K2/1b	K2/2a	K2/2b	K2/3a	K2/3b
$\rho$ kg/dm <sup>3</sup>	1,76	1,87	1,46	1,82	1,54	1,81	1,22
$\lambda$ W/ (m·K)	0,97	1,12	0,63	1,05	0,69	0,98	0,38
$c_p$ MJ/ (m <sup>3</sup> ·K)	1,46	1,72	1,55	1,77	1,61	1,74	1,37

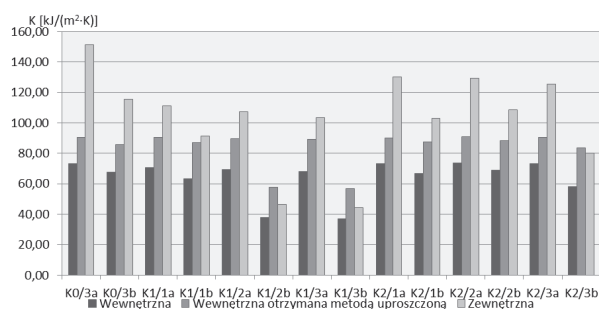
### OBLICZENIA DYNAMICZNYCH CHARAKTERYSTYK CIEPLNYCH

Aby ocenić w jakim zakresie mamy możliwość oddziaływania za pośrednictwem struktury materiałów na dynamiczne charakterystyki cieplne wykonanych z nich przegród, przeprowadzono obliczenia dla prostego schematu przegrody jednowarstwowej o jednakowo przyjętej grubości 18 cm dla każdego z testowanych 14 różnych kompozytów.

W obliczeniach uwzględniono specyficzne cechy każdego kompozytu oraz opory przejmowania ciepła powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej. Dzięki temu możliwe było porównanie parametrów dynamicznych przypisanych do poszczególnych przegród.

Natomiast wpływ tych kompozytów na dynamiczne charakterystyki cieplne warstwowych ścian zewnętrznych omówiono szerzej w pracy (Garbalińska, Strzałkowski, 2012).

Na rys. 1 przedstawiono dane dotyczące powierzchniowej pojemności cieplnej badanych kompozytów w odniesieniu do okresu wahań temperatur wynoszącego 24 godziny.

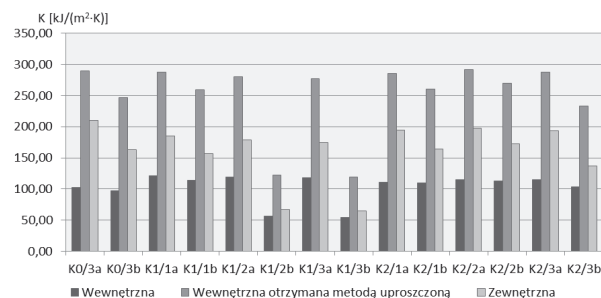


Rys. 1. Powierzchniowe pojemności cieplne dla okresu zmiany temperatury równego 24 h

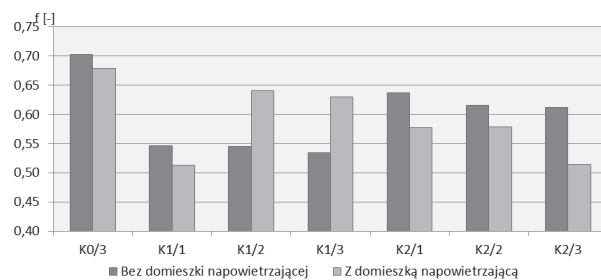
Wraz ze spadkiem gęstości obserwuje się spadek pojemności cieplnej danego kompozytu. Mimo to betony z kruszywami lekkimi bez domieszki napowietrzającej miały zbliżoną pojemność cieplną do betonu na bazie kruszywa kamiennego. Wynikało to z wpływu wody zawartej w kruszywie lekkim, której ciepło właściwe jest kilkukrotnie większe w porównaniu do samego betonu. W zestawieniu najkorzystniej wypadają betony na bazie kruszywa popiołoporytowego. Kompozyty z domieszką napowietrzającą wykazywały znaczący spadek pojemności w badanym okresie wahań 24 h. W betonach tych znacznie szybciej zachodził proces

naturalnego suszenia, co skutkowało obniżeniem zawartości wody w kompozycie. Na ich pojemność znaczący wpływ miała także obniżona gęstość objętościowa wynikająca z dużej zawartości powietrza w próbkach. Z porównania wyników otrzymanych metodą dokładną oraz uproszczoną wynika, że dla okresu 24 h różnice wynoszą 20 ÷ 30 %. Można zatem przyjąć, że w obliczeniach inżynierskich dla tak przyjętego okresu czasu wystarczające mogą być obliczenia wykonane metodą uproszczoną.

Wyniki zestawione na rys. 2 potwierdzają wnioski z danych dla okresu 24 h. Wielkości powierzchniowych pojemności cieplnych otrzymanych metodą uproszczoną są ponad dwukrotnie zawyżone w stosunku do zalecanej metody normowej. Im dłuższy okres wahań temperatury tym większy jest błąd metody uproszczonej. W świetle powyższego należy uznać, że przy wykonywaniu obliczeń dla komponentu budowlanego w okresie jednego tygodnia i jednego roku należy posługiwać się metodą dokładną.



Rys. 2. Powierzchniowe pojemności cieplne dla okresu zmiany temperatury równego 168 h

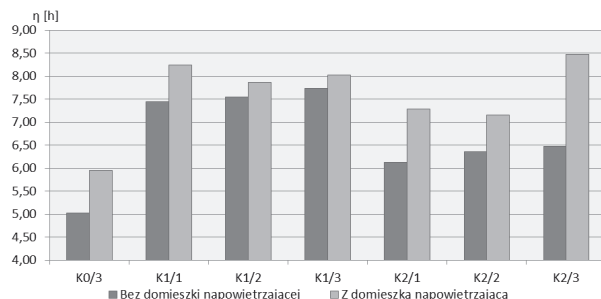


Rys. 3. Współczynnik tłumienia  $f$

Na rys. 3 zestawiono współczynniki tłumienia poszczególnych komponentów. Współczynnik tłumienia komponentów zależy od współczynnika przewodzenia ciepła, ale również od ciepła właściwego. Wraz ze wzrostem  $c_p$  i spadkiem  $\lambda$  wartość współczynnika tłumienia maleje. Im mniejsza wartość współczynnika tłumienia tym przegroda lepiej blokuje wahań temperatury środowiska zewnętrznego. W zestawieniu najgorzej wypadł beton na bazie kruszywa kamiennego. Betony z domieszką napowietrzającą charakteryzowały się zdecydowanie lepszymi wynikami. Wyjątek stanowią tu kompozyty K1/2 oraz K1/3. Mimo znaczącego spadku współczynnika przewodzenia ciepła tych betonów ich stateczność maleje. Wynika to z faktu, że betony te wykazywały największą utratę wody w procesie

niewymuszonego suszenia. W rezultacie ich objętościowe ciepło właściwe było dwukrotnie mniejsze w porównaniu z innymi kompozytami.

Rys. 4 obrazuje przesunięcia czasowe między amplitudami temperatur zewnętrznej i wewnętrznej.



Rys. 4. Przesunięcie czasowe między amplitudami temperatur po obu stronach komponentu.

Dla przyjętego okresu 24 godzin korzystne byłoby, aby komponent zapewniał co najmniej 8-godzinne przesunięcia czasowego między amplitudami temperatur po obu stronach przegrody. Dzięki temu w okresie letnim przegroda zabezpiecza pomieszczenie wewnętrzne przed przegrzewaniem spowodowanym wysoką temperaturą w trakcie dnia. Także w okresie zimowym, kiedy minimalna temperatura środowiska zewnętrznego występuje przeważnie w godzinach nocnych, takie przesunięcie czasowe chroni pomieszczenie przed nadmiernym wychłodzeniem. W zestawieniu najkorzystniej wypadły kompozyty na bazie kruszyw lekkich z domieszką napowietrzającą. W porównaniu do betonu zwykłego uzyskano wartości większe o  $1,5 \div 3,5$  h.

## WNIOSKI

Z uwagi na izolacyjność cieplną najlepsze okazały się betony na bazie keramzytu (K1) z zastosowaną domieszką napowietrzającą. Tego typu kompozyty cechowały się najniższymi wartościami współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$ . Należy jednak zaznaczyć, że betony te miały również stosunkowo niską wytrzymałość na ściskanie (Strzałkowski, 2012). Tak radykalnego zmniejszenia wytrzymałości nie zaobserwowano w przypadku betonów na kruszywie popiołoporytowym (K2), które wykazywały wytrzymałość na poziomie porównywalnym z betonem na kruszywie kamiennym (K0). Jednocześnie zapewniały jednak redukcję współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  nawet o 50%.

Najkorzystniejsze powierzchniowe pojemności ciepłe uzyskano dla betonów na bazie kruszywa popiołoporytowego. Również współczynniki tłumienia dla betonów opartych o kruszywa lekkie były zdecydowanie bardziej korzystne. Dodatkową poprawę wyników odnotowano przy zastosowaniu domieszki napowietrzającej. Stwierdzono także zdecydowanie większe przesunięcia czasowe między amplitudami temperatur po obu stronach komponentu (przy badanym okresie wahań 24 h) dla betonów na bazie kruszywa sztucznego.

Sprzyja to stabilizacji temperatury w pomieszczeniu, a w rezultacie lepiej służy zapewnieniu warunków komfortu cieplnego.

Podsumowując należy stwierdzić, że najkorzystniejszymi parametrami cechowały się betony na kruszywie popiołoporytowym. W porównaniu do betonu zwykłego wykazały dużo mniejszą gęstość objętościową, a równocześnie zdecydowanie lepsze parametry cieplne, przy zachowaniu porównywalnej wytrzymałości, testowanej w dalszych badaniach, przeprowadzonych w ramach pracy (Strzałkowski, 2012).

## SPIS SYMBOLI

$\lambda$	współczynnik przewodzenia ciepła	W/(m·K)
T	rozpatrywany okres wahań temperatury	s
$\rho$	gęstość objętościowa	kg/m <sup>3</sup>
c	ciepło właściwe	J/(kg·K)
$\overline{\Theta}_n$	przeciętna wartość temperatury	°C
$\overline{\Phi}_n$	przeciętna wartość strumienia ciepła	W/m
$ \overline{\Theta}_n $	amplituda wahań temperatury	K
$ \overline{\Phi}_n $	amplituda wahań strumienia ciepła	W/m
$\omega$	częstotliwość kątowna wahań	1/s
$A_{si}$	amplituda wahań temperatury w pomieszczeniu	K
$A_{se}$	amplituda wahań temperatury na zewnątrz	K
$Y_{12}$	okresowa transmitancja	(m <sup>2</sup> ·K)/W
U	współczynnik przenikania ciepła	W/(m <sup>2</sup> ·K)

## LITERATURA CYTOWANA

- Domagała L., 2010, *Wytrzymałość konstrukcyjnych betonów lekkich a wstępna wilgotność kruszyw porowatych*, Konferencja Dni Betonu
- Garbalińska H., Strzałkowski J., 2012, *Analiza porównawcza dynamicznych charakterystyk cieplnych przegród wykonanych z różnych kompozytów betonowych*, Inżynieria i Budownictwo, no 6/2012, p. 307–311
- PN-EN ISO 13786:2008, *Cieplne właściwości użytkowe komponentów budowlanych. Dynamiczne charakterystyki cieplne. Metody obliczania*
- Strzałkowski J., 2012, *Ocena przydatności wybranych kompozytów betonowych do wznoszenia ścian zewnętrznych*. Praca magisterska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie