

mgr inż. Janusz Krentowski (*)
prof. dr hab. inż. Mikołaj Syczewski (*)
prof. dr hab. inż. Rościsław Tribillo (*)

METODA MINIMALIZACJI ODKSZTAŁCENŃ TERMICZNYCH W ŻELBETOWYCH PRZEKRYCIACH POWŁOKOWYCH

1. Wstęp

Proces inwestycyjny w przypadku obiektów budowlanych rozpoczyna się od fazy wstępnej, tj. etapu projektowania. Jednym z czynników decydujących o bezpieczeństwie, estetyce i warunkach eksploatacji budynku jest poprawne określenie rodzaju i wartości obciążeń przekazywanych na elementy konstrukcyjne, zarówno w stadium realizacji jak i użytkowania. Czynnikiem, którego negatywny wpływ na trwałość budowli bywa często pomijany, jest temperatura. Zjawisko zarysowań elementów konstrukcyjnych, narażonych na działanie zmiennego pola temperatur zewnętrznych, znajduje potwierdzenie [2], [4], w eksploatowanych obiektach przemysłowych lub użyteczności publicznej, np. w halach czy kościołach.

2. Obciążenie żelbetowych elementów konstrukcyjnych temperaturą

Projektowane elementy konstrukcyjne powinny być odporne na obciążenie temperaturą, określone zgodnie z normami [8] i [9]. Obliczenia należy przeprowadzać dla obiektu w stanie realizacyjnym, kiedy budowla jest konstrukcją otwartą oraz w stadium eksploatacji, tj. dla budowli zamkniętej.

Według postanowień normy [8] odkształcenia konstrukcji od wpływu temperatury i skurczu betonu w budowlach na wolnym powietrzu należy obliczać jako odpowiadające ochłodzeniu i ogrzaniu o 20°C , natomiast w budynkach osłoniętych jako odpowiadające ochłodzeniu i ogrzaniu o 10°C . Wartość współczynnika odkształcalności termicznej betonu można przyjmować równą $\alpha_t = 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

(*) - Politechnika Białostocka

Przekrój łuku ukształtowano w postaci odwróconej litery „T”. W górnej strefie łuk połączono z poziomą belką żelbetową. Dolną półkę tak powstałego przekroju połączono z płytą powłoki. Powierzchnia przekrycia, widoczna od strony kościoła została podzielona pilastrami o wysokości 26 cm i szerokości 104 cm. Elementy konstrukcyjne zostały wykorzystane do ukształtowania detali architektonicznych. Przewidziano wykonanie ocieplenia konstrukcji płytami z wełny mineralnej, układanej warstwami bezpośrednio na górnej powierzchni powłoki. Drewniana więźba dachowa, pokryta blachą miedzianą, ustawiona zostanie na żelbetowym ruszcie, obciążającym dodatkowo konstrukcję łukowo-belkową.

4. Odształcenia termiczne przekrycia w stadium realizacji

Prace budowlane w obiektach sakralnych zwykle są długotrwałe, a realizowane elementy konstrukcyjne są narażone na działanie zmiennej temperatury zewnętrznej, zależnie od zmieniających się pór roku. Stąd niezbędne jest określenie maksymalnych temperatur obciążających konstrukcję w porze letniej i zimowej.

Wartość średnią temperatury, nieosłoniętego przed działaniem promieniowania słonecznego przekrycia żelbetowego, dla pory letniej oblicza się wg wzoru (2)

$$\bar{t}_e = t_e + \frac{A \cdot I}{\alpha_e} (R_1 + 0,5R) \cdot k + \psi (a \cdot \xi_1 + \frac{A \cdot a_1}{\alpha_e} \xi_2) \quad (2)$$

a dla pory zimowej ze wzoru (3)

$$\bar{t}_z = t_e - a \cdot \xi_1 \quad (3)$$

Oznaczenia we wzorach (2) i (3) są następujące:

$t_e = 27^\circ C$ - temperatura powietrza zewnętrznego dla pory letniej,

$t_e = -24^\circ C$ - temperatura powietrza zewnętrznego dla pory zimowej,

A - współczynnik pochłaniania promieniowania słonecznego, dla powierzchni betonu o odcieniu szarym, matowym $A = 0,5$,

I - natężenie całkowitego promieniowania słonecznego działającego na powierzchnię ściany,

α_e - współczynnik przyjmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej, $\alpha_e = 20 W/m^2K$,

R_e - opór przyjmowania ciepła na powierzchniach zewnętrznych, $R_e = 0,05 m^2K/W$,

R_1 - opór przyjmowania ciepła na powierzchniach wewnętrznych dachów, przy przepływie ciepła z góry na dół, $R_1 = 0,17 m^2K/W$,

R - opór cieplny przegrody bez oporów przyjmowania ciepła, w analizowanym przypadku wg [10] $R = 0,09 m^2 K/W$,

ψ - współczynnik jednoczesności działania wartości maksymalnych dobowych temperatur powietrza zewnętrznego i promieniowania słonecznego, $\psi = 1,0$,

a - amplituda dobową wartości chwilowej temperatury powietrza zewnętrznego, $a = 8^{\circ}C$,

ξ_1 - współczynnik redukcji amplitudy dobowej różnicy temperatur przy dwustronnym napływie ciepła, $\xi_1 = 0,80$,

ξ_2 - współczynnik redukcji amplitudy dobowej różnicy temperatur przy jednostronnym napływie ciepła, $\xi_2 = 0,45$,

a_t - różnica między wartością maksymalną dobową promieniowania słonecznego całkowitego a wartością średnią dobową, dla powierzchni poziomej $a_t = 564 W/m^2$.

W analizowanym przykładzie, korzystając z normowych wzorów (2) i (3), otrzymano wartości charakterystyczne temperatury w okresie letnim i zimowym

$$\bar{\vartheta}_1 = +46^{\circ}C \text{ i } \bar{\vartheta}_z = -32^{\circ}C,$$

oraz różnice temperatur

$$\Delta t_1 = +46^{\circ}C - 10,0^{\circ}C = +36^{\circ}C,$$

$$\Delta t_z = -32^{\circ}C - 10,0^{\circ}C = -42^{\circ}C.$$

Wartości obliczeniowe obciążenia temperaturą otrzymuje się przyjmując współczynnik $\gamma_f = 1,1$:

$$\Delta t_1^o = \Delta t_1 \cdot \gamma_f = +36^{\circ}C \cdot 1,1 = +39,6^{\circ}C,$$

$$\Delta t_z^o = \Delta t_z \cdot \gamma_f = -42^{\circ}C \cdot 1,1 = -46,2^{\circ}C.$$

Konstrukcja przekrycia obciążona jest temperaturą dużo większą niż przyjmowana standardowo w normie [8], gdzie granica zmian dla ogrzania i ochłodzenia wynosi $20^{\circ}C$.

Przyrost długości odcinka powłoki segmentu I o długości $20,4 m$ w okresie letnim wyniesie

$$+\Delta L_1 = \alpha_t \cdot \Delta t_1^o \cdot L = 0,00001 \cdot 39,6 \cdot 2040 = 0,81 cm,$$

a skrócenie odcinka powłoki zimą będzie równe

$$-\Delta L_z = \alpha_t \cdot \Delta t_z^o \cdot L = 0,00001 \cdot 46,2 \cdot 2040 = 0,94 cm.$$

Ponieważ przeciwdziałanie siłom, które powstaną w konstrukcji o bardzo dużej sztywności nie jest możliwe dla odkształcenia

$$\Delta L = 0,81 + 0,94 = 1,75 cm,$$

konstrukcję należy realizować etapowo, sukcesywnie wraz z powłoką wznosząc więźbę i pokrycie dachu. Wartość średnią temperatury dla pory letniej, przekrycia żelbetowego osłoniętego przed działaniem promieniowania słonecznego, oblicza się wg wzoru (4)

$$\bar{\vartheta}_l = t_e + a \cdot \xi_1 \quad (4)$$

W analizowanym przykładzie wartość średnia temperatury zmniejszy się do

$$\bar{\vartheta}_l = t_e + a \cdot \xi_1 = 27 + 8 \cdot 0,8 = 33,4^\circ C,$$

a wartość obliczeniowa wynosić będzie

$$\bar{\vartheta}_l = 1,1 \cdot 33,4 = 36,7^\circ C < 46 \cdot 1,1 = 50,6^\circ C$$

i jest niższa niż w stanie nieosłoniętym.

Poprawne wykonanie konstrukcji przekrycia wymaga jednak zapewnienia w trakcie realizacji obiektu, warunków termicznych odpowiadających budowli o konstrukcji zamkniętej.

5. Odształcenia termiczne przekrycia w stadium użytkowania

W stadium użytkowania konstrukcja przekrycia zostanie ocieplona warstwą wełny mineralnej o grubości 10cm, co wpłynie na zwiększenie termoizolacyjności przegrody [10]. Ustawienie nad powłoką żelbetową, drewnianej więźby dachowej wyeliminuje możliwość bezpośredniego nasłonecznienia.

Wartość średnią temperatury dla budowli zamkniętej, osłoniętej przed działaniem promieniowania słonecznego, dla pory letniej oblicza się wg wzoru (5)

$$\bar{\vartheta}_l = t_i + (t_e - t_i)(R_i + 0,5R) \cdot k + a \cdot \xi_2 \quad (5)$$

a dla pory zimowej ze wzoru (6)

$$\bar{\vartheta}_z = t_i + (t_e - t_i)(R_i + 0,5R) \cdot k - a \cdot \xi_2 \quad (6)$$

Oznaczenia we wzorach (5) i (6) są następujące:

t_i - temperatura powietrza wewnętrznego dla pory letniej, $t_i = 30^\circ C$,

t_i - temperatura powietrza wewnętrznego dla pory zimowej, wg [6] lub [7] $t_i = 12^\circ C$,

R - opór cieplny przegrody bez oporów przejmowania ciepła, wg [10] $R = 2,09 m^2K/W$,

$\xi_1 = 0,1$, $\xi_2 = 0,05$,

pozostałe wartości są analogiczne do przyjętych w rozdziale 5.

Charakterystyczne wartości temperatury w okresie letnim i zimowym dla budowli zamkniętej otrzymano ze wzorów (5) i (6)

$$\bar{\vartheta}_l = +28,9^\circ C \text{ i } \bar{\vartheta}_z = -6,9^\circ C,$$

oraz różnice temperatur ze wzoru (1)

$$\Delta t_1 = +28,9^{\circ}C - 10,0^{\circ}C = +18,9^{\circ}C,$$

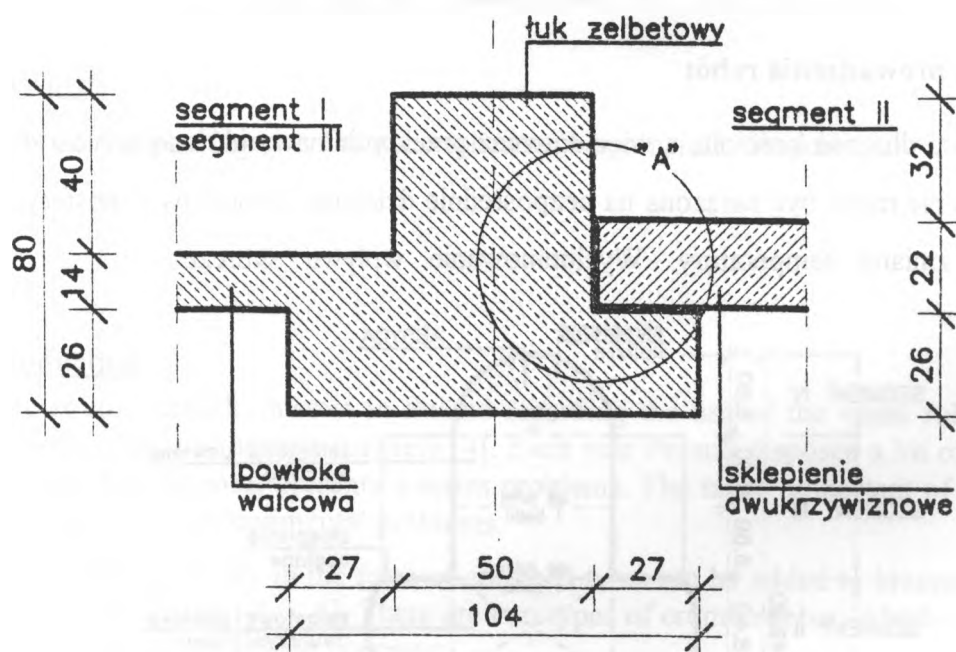
$$\Delta t_2 = -6,9^{\circ}C - 10,0^{\circ}C = -16,9^{\circ}C.$$

Wartości obliczeniowe obciążenia temperaturą otrzymuje się przyjmując współczynnik $\gamma_f = 1,1$.

$$\Delta t_1^o = \Delta t_1 \cdot \gamma_f = +18,9^{\circ}C \cdot 1,1 = +20,8^{\circ}C,$$

$$\Delta t_2^o = \Delta t_2 \cdot \gamma_f = -16,9^{\circ}C \cdot 1,1 = -18,6^{\circ}C.$$

Zgodnie z normą [9], w stadium użytkowym po ociepleniu powłoki, konstrukcja przekrycia obciążona jest temperaturą zbliżoną do wartości określonych w normie [8] dla budowli nieosłoniętej, gdzie granica zmian dla ogrzania i ochłodzenia wynosi $20^{\circ}C$.



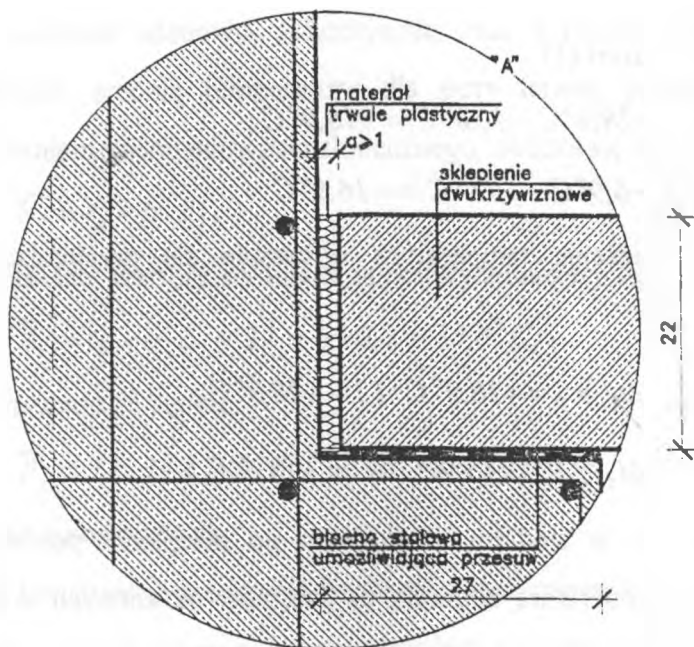
Rys. 2. Połączenie elementów konstrukcyjnych przekrycia

Przyrost długości odcinka powłoki segmentu I o długości 20,4 m w okresie letnim, przy obustronnym zdylatowaniu powłoki od pozostałych elementów konstrukcyjnych, wyniesie

$$+\Delta L_1 = 0,5\alpha_1 \cdot \Delta t_1 \cdot L = 0,5 \cdot 0,00001 \cdot 20,8 \cdot 2040 = 0,21 \text{ cm}$$

a skrócenie odcinka powłoki zimą będzie równe

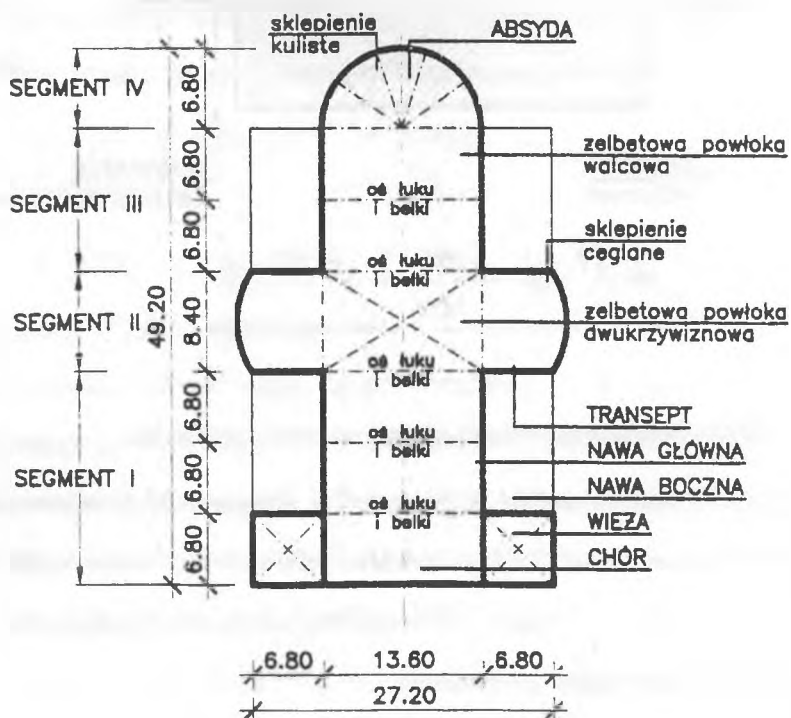
$$-\Delta L_2 = 0,5\alpha_1 \cdot \Delta t_2 \cdot L = 0,5 \cdot 0,00001 \cdot 18,6 \cdot 2040 = 0,19 \text{ cm}.$$



Rys. 3. Szczegół „A”. Szczelina dylatacyjna

6. Technologia prowadzenia robót

Całkowita długość kościoła, a więc również przekrycia nawy głównej wynosi 49,2 m. Płyta sklepienia nie może być narażona na bezpośrednie działanie czynników atmosferycznych powodujących zmiany temperatury. Wyeliminowanie wpływu skurczu



Rys. 4. Schemat kolejności realizowania robót

betonu oraz rozszerzalności termicznej może być zrealizowane poprzez odpowiednią kolejność prowadzenia prac betonowych. Przekrycie należy realizować sukcesywnie, w sposób umożliwiający wznoszenie wraz z powłoką więźby, warstw ocieplających i pokrycia dachu.

Betonowanie sklepienia należy rozpocząć od części I, skrajnej. Równocześnie roboty mogą być prowadzone w części III, tj. między transeptami a scholą. W kolejnych etapach należy zabetonować sklepienie nawy głównej w części II, środkowej, pomiędzy transeptami. Niezbędne jest umożliwienie przesuwu względem siebie elementów konstrukcyjnych w sąsiednich segmentach, poprzez wykonanie dylatacji. Prace zakończy wykonanie półkolistej czaszy nad scholą.

Ze względu na etapową realizację przekrycia, ocieplenie powłoki wełną mineralną i użytkowanie obiektu w temperaturze zbliżonej do stałej, odkształcenia w fazie użytkowej będą nieznaczne. Zaistniałe wydłużenia liniowe elementów żelbetowych, o wartościach określonych na podstawie zrealizowanych obliczeń zostaną rozproszone w postaci zarysowań mikrostrukturalnych [5], dopuszczalnych postanowieniami normy [8].

7. Wnioski

W wyniku przeprowadzonej analizy obciążenia temperaturą stwierdzono, że spełnienie jedynie wymagań określonych w normie [8], może prowadzić do wystąpienia stanu zarysowań w elementach konstrukcyjnych, narażonych na bezpośrednie nasłonecznienie. Wytyczne obciążenia temperaturą zawarte w normie [9] są ostrzejsze i powinny być uwzględnione w fazie projektowania.

W przypadku konstrukcji powłokowych szczególnie istotne są warunki obciążenia temperaturą w okresie, kiedy obiekt jest budowlą otwartą, latem narażoną na bezpośrednie działanie promieni słonecznych, a zimą poddaną działaniu ujemnej temperatury zewnętrznej. Odkształcenia elementów wywołane wpływami termicznymi, mogą być w znacznym stopniu ograniczone, w efekcie właściwie dobranej technologii i kolejności robót betonowych oraz poprzez zastosowanie przerw dylatacyjnych, umożliwiających kompensację powstałych odkształceń termicznych.

LITERATURA

1. **Kobiak J., Stachurski W.:** Konstrukcje żelbetowe. Arkady, Warszawa 1991.
2. **Kobiak J.:** Błędy w konstrukcjach żelbetowych. Arkady, Warszawa 1971.
3. **Krentowski J., Tribillo R.:** Wybrane problemy projektowania i realizacji przekrycia nawy kościoła. Konferencja Naukowo-Techniczna Politechniki Białostockiej, Białystok 1996.
4. **Makułski W.:** Analiza charakterystycznych katastrof i awarii budowlanych w latach 1961-1967. Wydawnictwo Katalogów i Cenników, Warszawa 1970.
5. **Neville A.M.:** Właściwości betonu. Arkady, Warszawa 1977.
6. PN-82/B-02402: Ogrzewnictwo. Temperatury ogrzewanych pomieszczeń w budynkach.
7. PN-82/B-02403: Ogrzewnictwo. Temperatury obliczeniowe zewnętrzne.
8. PN-84/B-03264: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
9. PN-86/B002015: Obciążenia budowli. Obciążenie zmienne środowiskowe. Obciążenie temperaturą.
10. PN-90/B-02020: Ochrona cieplna budynków. Wymagania i obliczenia.

THE MINIMIZATION OF THE THERMAL DEFORMATION OF REINFORCED CONCRETE SHELL COVER

Summary

The paper presents the influence of the temperature load on strain limit state of reinforced concrete cylindrical shell, which is the cover of church nave. The authors made a thorough analysis of influence of outdoor temperatures differences in realization and exploitation phase of structures on deformation quantity of cover elements. The computational example shows the extensions values of concrete shell which is almost 50 m long and was subjected to changeable field of outdoor temperatures. The prescriptions which concern the extension of building work and take into account the favourable conditions of temperature difference in realization and exploitation phase, have been presented. The conclusions concern the way of heat insulating protection of structural elements which have big surface and are subjected to influence of changeable outdoor temperatures.