

Energoaktywne segmenty dylatacyjne hal z przekryciem strukturalnym

Zbigniew Kowal, Rafał Piotrowski¹

¹ *Katedra Mechaniki Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych,
Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska,
e-mail: zbigko@tu.kielce.pl, rafalp@tu.kielce.pl*

Streszczenie: W pracy pokazano wyniki opracowania ekonomicznej koncepcji energoaktywnych segmentów dylatacyjnych wielkopowierzchniowych hal, w których: 1) zastosowano przekrycia strukturalne, 2) zmniejszono wpływy termiczne na siły i przemieszczenia do konwencjonalnych wielkości normowych [1], 3) zachowano nośność i niezawodność powyżej zalecanej w klasie RC2 [2], 4) dobrano schemat statyczny hali tak, aby awaryjne wpływy termiczne nie wpływały na niezawodność segmentów dylatacyjnych hali. Ten efekt uzyskano przez rozdzielenie belkowych i przechyłowych kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia wydzielonych energoaktywnych segmentów dylatacyjnych hali.

Słowa kluczowe: energoaktywne segmenty hal, struktury metalowe.

1. Wprowadzenie

Przedstawiono koncepcję budowy energoaktywnych segmentów dylatacyjnych wielkopowierzchniowych hal przystosowanych do pozyskiwania energii cieplnej (EC) z promieniowania słonecznego i transportu EC za pośrednictwem ogrzanego powietrza do miejsc jej użytkowania lub do gruntowych magazynów EC. Konstrukcja segmentów, zawierająca absorbery, została przekryta strukturą opartą na słupach. Wnętrze struktury pełni również funkcję kanałów transportu ogrzanego powietrza do odbiorników oraz magazynów EC. Po oddaniu ciepła powietrze wraca do obiegu lub jest usuwane na zewnątrz [3,4].

W koncepcji podziału geometrii hali na segmenty dylatacyjne wykorzystano następujące założenia: 1) swobodne wydłużenie termiczne Δ , po długości energoaktywnego segmentu dylatacyjnego hali powinno być mniejsze od normowego wydłużenia segmentu dylatacyjnego w halach konwencjonalnych z ostożowym podłużnym stężeniem słupów w środku długości hali, 2) średnia wysokość powierzchni Polski n.p.m. wynosi 173m. Maksymalna temperatura powietrza w cieniu [1] wynosi $T_{max}(H) = -0,0053H + 38^{\circ}\text{C} \approx 37^{\circ}\text{C}$. Temperatura ciemnego pokrycia hali na stronie południowo-zachodniej jest większa o $T_s = 42^{\circ}\text{C}$. Łącznie temperatura obudowy może osiągnąć $T_{uot} = T_{max} + T_s = 37 + 42 = 79^{\circ}\text{C}$. W ziemi temperatura powietrza osiąga $T_{min}(H) \approx -31,6^{\circ}\text{C}$, 3) założono, że awaryjna temperatura konstrukcji zawierającej absorbery w segmencie dylatacyjnym nie przekroczy $+100^{\circ}\text{C}$, 4) zastosowane zostanie automatyczne włączanie transportu ogrzanego powietrza do magazynów EC za pomocą wentylatorów ssąco - tłoczących przy osiągnięciu umownej temperatury nagrzewanego powietrza rzędu $+21^{\circ}\text{C}$, 5) niezawodność wydzielonego segmentu dylatacyjnego hali spełni wymagania niezawodności klasy RC2 [2], określonego wskaźnikiem niezawodności $t = \beta = 3,8$, 6) konstrukcja segmentu dylatacyjnego hali złożona z geometrycznie niezmiennych segmentów montażowych spełni wymagania optymalizacji czasu i kosztów montażu konstrukcji.

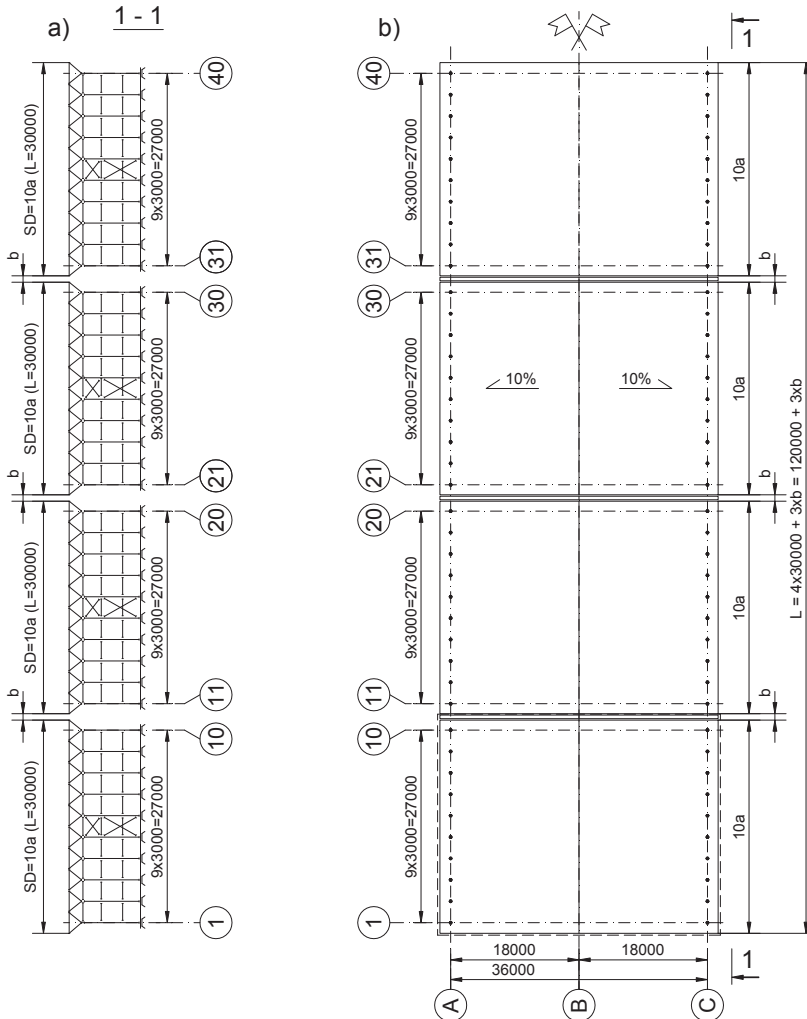
2. Hale przekryte strukturą regularną

Na rysunku 1 oraz 2 pokazano przykładową koncepcję podziału energoaktywnej hali przekrytej strukturą regularną o module $a = 3\text{m}$, na segmenty dylatacyjne. Halę długości $L_a = 120\text{m} + 3b$, rozpiętości $L = 36\text{m}$, przekryto strukturą regularną ze spadkiem połaci

$\operatorname{tg}\alpha = 10\%$ ($\alpha = 5^{\circ}43'$) (rys.2a).

W przedstawionej hali złożonej z energoaktywnych segmentów dylatacyjnych, zastosowano rurowy transport ogrzanego powietrza z przestrzeni konstrukcyjnej przekrycia do odbiorników i gruntowych magazynów energii cieplnej (rys.2a). Hala podzielona na 4 segmenty dylatacyjne długości $L_d = 30\text{m}$ (rys.1). W środku ścian podłużnych (rys.1a) każdego segmentu dylatacyjnego, umieszczono stężenia ostożkowe (główne) umożliwiając symetryczne wydłużenie segmentu pod wpływem temperatury. Słupy dano w odstępach modułowych $a = 3\text{m}$, zgodnie z rozmieszczeniem węzłów dolnych struktury. Rygle ścian podłużnych korzystnie rozmieszczono w odstępach modułowych skorelowanych z modułem obudowy.

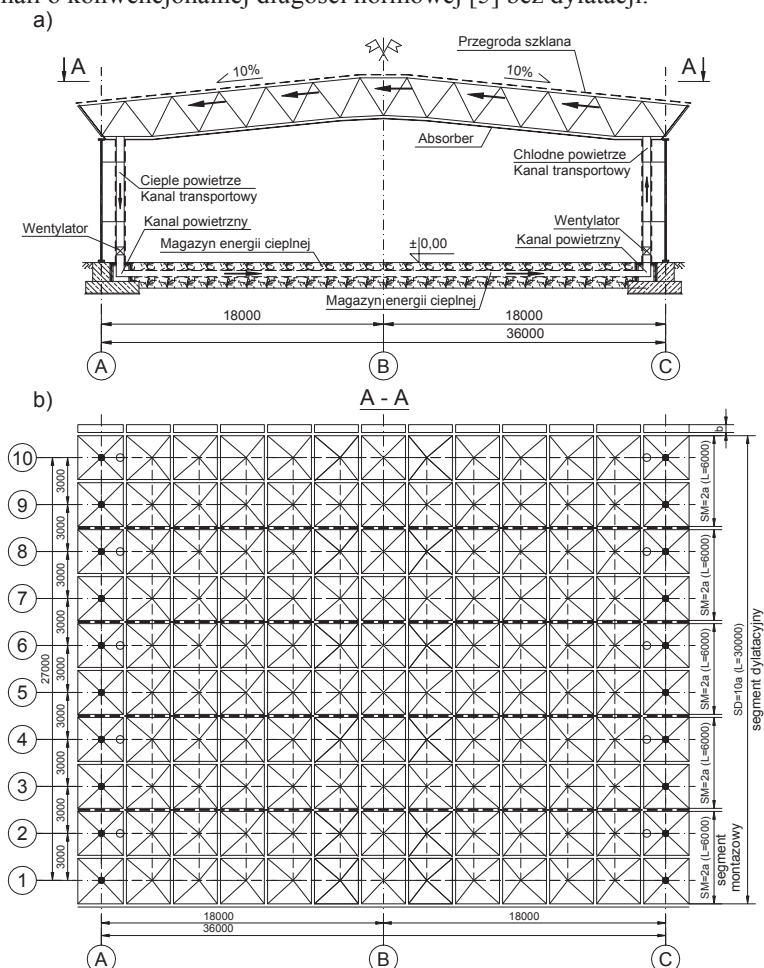
Korelacja modułowa połączi z modułem rozmieszczenia słupów ukryta jest w rzucie poziomym przekrycia. Przy 10% nachyleniu połaci i parzystej liczbie oczek, w rachubę wchodzi wydłużenie δ modułu a_1 wzdłuż spadku połaci $a_1 = a + \delta$, o 15mm ($a_1 = 3,015\text{m}$).



Rys. 1. Podział hali przekrytej strukturą regularną na segmenty dylatacyjne: a) rozmieszczenie słupów, b) rzut segmentów dylatacyjnych.

Każdy energoaktywny segment dylatacyjny złożony z 5 geometrycznie niezmiennych segmentów montażowych szerokości 2 oczek ($2a = 6\text{m}$) (rys.2b). Segmenty montażowe składane są na poziomym terenie z elementów wysyłkowych postaci odwróconych piramid prętowych w piramidowo bocznym systemie montażowym. Przygotowany segment montażowy podnoszony jest dźwigiem i osadzany na 4 słupach ścian podłużnych, styknie do sąsiednich segmentów montażowych. Pasy górne łączone są śrubami. Następnie łączone są sąsiadujące węzły dolne prętami dolnymi.

Długość $L_d = 10a = 30\text{m}$ segmentu dylatacyjnego przyjęto na podstawie oszacowania niezawodności minimalnych krytycznych zbiorów (MKZ) występujących w kinematycznie dopuszczalnych mechanizmach zniszczenia (KDMZ). Swobodne wydłużenie segmentu struktury wzdłuż hali, w przypadku awaryjnej różnicy temperatury $\Delta T = +100^\circ\text{C}$ wynosi: $\Delta L = 0,5L_d\Delta T\alpha_r = 18\text{mm}$ i jest mniejsze aniżeli swobodne wydłużenie normowe hali o konwencjonalnej długości normowej [5] bez dylatacji.



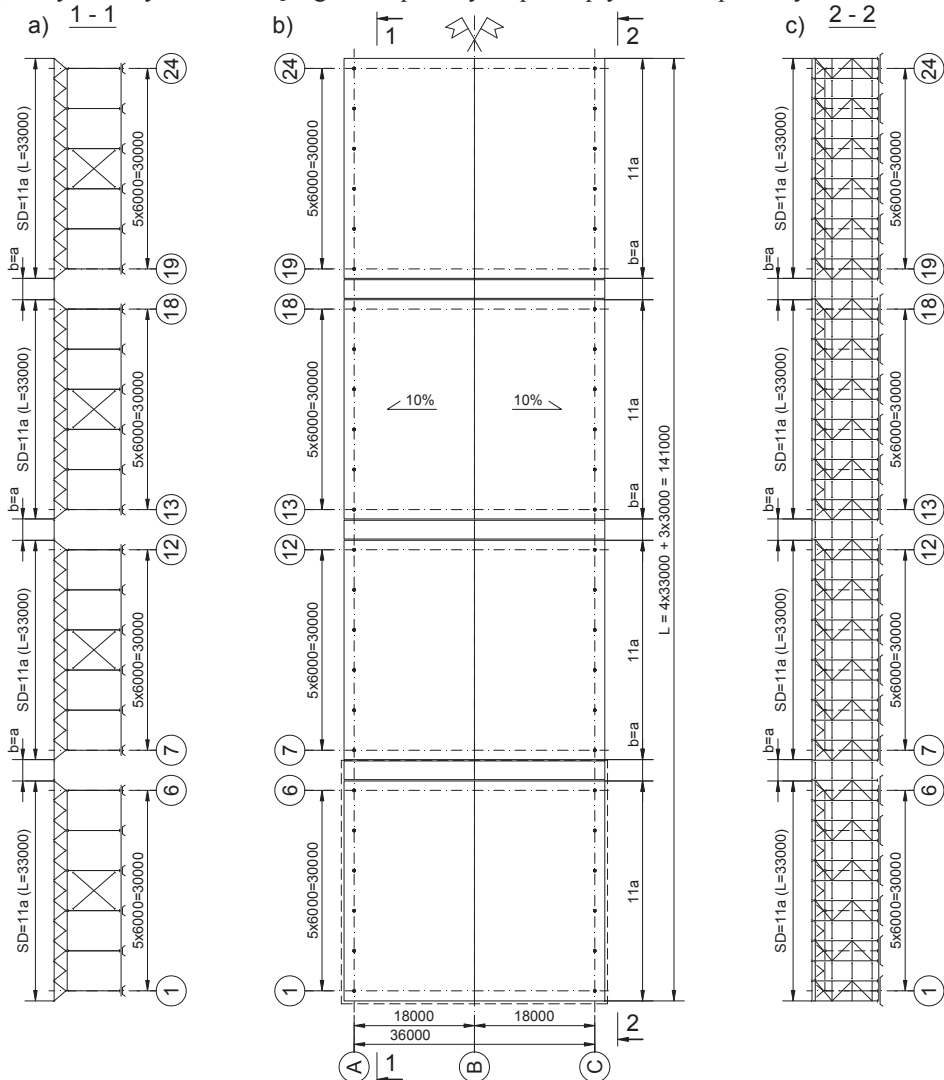
Rys. 2. Wydzielony segment dylatacyjny hali przekrytej strukturą regularną: a) przekrój poprzeczny hali, b) podział segmentu dylatacyjnego na segmenty montażowe.

3. Hale przekryte strukturą zredukowaną

Na rysunkach 3 i 4 pokazano koncepcję podziału energoaktywnej hali o module $a = 3\text{m}$, długości $L_a = 132\text{m} + 3(b = a)$, na 4 segmenty dylatacyjne długości $L_d = 33\text{m}$,

oparte na 6 słupach każdy (rys.4b). Hala przekryta strukturą zredukowaną jest racjonalnie podparta co 6m (w co drugim oczku pełnym) na słupach ścian podłużnych.

W omawianej hali pokazano dwie koncepcje transportu ograniczonego powietrza ze struktury do magazynów energii cieplnej. Rury służące do tłoczenia ciepłego powietrza, w zależności od sposobu podparcia, można lokalizować: przy słupach jednogałęziowych (rys.3a,4a) lub transportować wewnątrz słupów trójgałęziowych (rys.3c,4a). W przypadku podparcia konstrukcji przekrycia na słupach jednogałęziowych (rys.3a) zastosowano stężenia ostożkowe w środku długości segmentów montażowych - umożliwiając symetryczne wydłużanie się segmentu przekrycia pod wpływem temperatury.



Rys. 3. Podział hali przekrytej strukturą regularną na segmenty dylatacyjne: a) rozmieszczenie słupów jednogałęziowych, b) rzut segmentów dylatacyjnych, c) rozmieszczenie słupów trójgałęziowych.

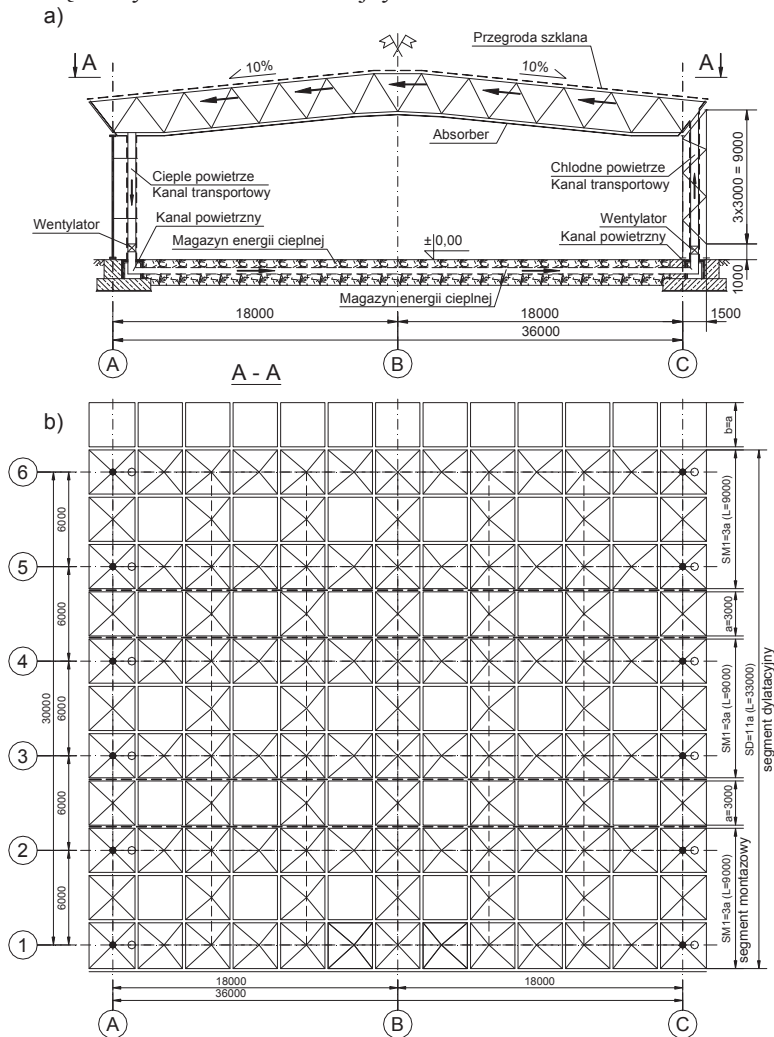
Na rysunku 4b pokazano rzut segmentu dylatacyjnego z podziałem na geometrycznie niezmiennie 3 segmenty montażowe o szerokości $3a$ ($3a = 9m$) uzupełnione dwiema wstawkami szerokości a z odrębnych piramid i ramek prętowych.

W koncepcji pokazanej na rysunku 3a, występuje 6 słupów skojarzonych z 6 silnie rozciąganyymi pasami dolnymi przekrycia hali. Pasy te wchodzi w skład najbardziej

wyższych kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia hali (KDMZ). Z punktu widzenia niezawodności w przykładzie pokazanym na rysunku 3a sprężnięto 6 pasów dolnych. Ponadto sprężonych strukturą zostało również 6 słupów. Ta liczba sprężniętych pasów i słupów zgodnie z pracami [6,7,8] jest wystarczająca do zapewnienia nośności i wskaźnika niezawodności zgodnie z zaleceniami norm [2,9] ($t > 3,8$).

Dotrzymanie modułowego podziału geometrycznego powierzchni mało nachylonej połaci dachowej hali jest możliwe w drodze zastosowania podziału geometrycznego wzdłuż połaci dachowej $a_1 = a + \delta$. Niewielkie odchylenie, wynoszące $\delta = 15\text{mm}$ przy 10% nachyleniu połaci dla $a = 3\text{m}$ można wykorzystać do kompensacji termicznych przemieszczeń absorberów i obudowy zwłaszcza szklanej, wrażliwej na uszkodzenia (rys.4a)

lub zgubić sumę odchyłek $\Sigma\delta$ w oczku skrajnym.



Rys. 4. Wydzielony segment dylatacyjny hali przekrytej strukturą zredukowaną: a) przekrój poprzeczny hali, b) podział segmentu dylatacyjnego na segmenty montażowe.

4. Nośność i niezawodność segmentów dylatacyjnych konstrukcji energoaktywnych

Nośność i niezawodność segmentów dylatacyjnych oszacowano za pośrednictwem analizy kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia (KDMZ). W koncepcji segmentów dylatacyjnych hali przekrytej strukturą regularną (rys. 1 i 2) wybrano do analizy: 1) najmniejsze przechyłowe KDMZ składające się z 10 słupów sprzężonych strukturą regularną przekrycia oraz 2) 12 belkowych KDMZ przekrycia każdy składający się z 10 rozciąganych prętów pasów dolnych oraz 13 KDMZ, każdy złożony z 11 ściskanych pasów górnych również sprzężonych prętami struktury regularnej.

W przypadku przekrycia hali strukturą z co drugim oczkiem pustym (rys. 3 i 4) występują: 1) przechyłowe KDMZ składające się z 6 słupów sprzężonych strukturą przekrycia oraz 2) 12 belkowych KDMZ przekryć składające się z 6 międzywęzłowych rozciąganych prętów dolnych również sprzężonych prętami struktury zredukowanej. Pozostałe KDMZ zawierają większą liczbę prętów.

Oczekiwany na podstawie obliczeń i wymiarowania elementów wg normy [2] wskaźnik niezawodności elementów konstrukcji wynosi: $t_1 > 3,8$, oczekiwana niezawodność [10] wynosi: $p_1 = 0,999\ 927\ 652$, awaryjność: $q_1 = 1 - p_1 = 0,000\ 072\ 348$.

Kwantyl nośności (odpowiednik nośności obliczeniowej) elementów sprawczych wyznacza się ze wzoru (1) [6]:

$$N_{ik} = E(N_i) - tD(N_i) = E(N_i)[1 - tv_1] \quad (1)$$

gdzie: $v_1 = D(N_i)/E(N_i)$ – współczynnik zmienności nośności, $E(N_i)$ – nośność oczekiwana (średnia), $D(N_i)$ - odchylenie standardowe nośności pojedynczego elementu.

Kwantyl N_k nośności n „jednakowych” elementów sprawczych sprzężonych w jednym KDMZ oszacowano z wzoru (2) [6]:

$$N_k = nE(N_i) - tn^{0.5}D(N_i) = nE(N_i)[1 - tn^{0.5}D(N_i)/nE(N_i)] = nE(N_i)[1 - tv_1/n^{0.5}] \quad (2)$$

W minimalnym geometrycznie niezmiennym segmencie montażowym występują dwa pasy dolne. Zniszczenie jednego pasa wywołuje KDMZ. Im mniejsza liczba elementów n w minimalnym krytycznym zbiorze (MKZ) stowarzyszonych z KDMZ tym większą należy zachować ostrożność statystyczną. Wskazane jest sprzęganie w jednym KDMZ powyżej 4 elementów. Zwiększenie nośności elementów w MKZ stowarzyszonym z KDMZ możemy oszacować ze wzoru (3) [6]:

$$s = N_k/nN_{ik} = [1 - t_1v_1/n^{0.5}]/[1 - t_1v_1] \quad (3)$$

Przykład 1. W przypadku sprzężenia $n = 10$ słupów lub elementów pasów o współczynniku $v_1 = 0,06$ w jednym KDMZ zwiększenie ich nośności ponad oczekiwane na podstawie obowiązujących norm wynosi:

$$N_k/nN_{ik} = [1 - 3,8v_1 / 3,162]/[1 - 3,8v_1] = [1 - 0,0721]/[1 - 0,228] = 0,9279 / 0,772 = \mathbf{1,202}$$

Wniosek 1. W przypadku bardzo dobrego wykonania konstrukcji (współczynnik zmienności $v_1 = 0,06$) zwiększenie nośności 10 elementów sprzężonych w MKZ elementów wynosi: $N_k/nN_{ik} = 1,202$. Takie zwiększenie (powyżej zaleceń normowych [2]) nośności kompensuje zmniejszenie nośności wywołane wirtualnym szeregowym połączeniem wszystkich elementów występujących w analizowanej konstrukcji [8].

Przykład 2. W przypadku gorszego wykonania $v_1 = 0,10$ analizowanej konstrukcji współczynnik zwiększenia nośności 10 sprzężonych elementów wynosi:

$$N_k/nN_{ik} = [1 - 3,8v_1 / 3,162]/[1 - 3,8v_1] = [1 - 0,1202]/[1 - 0,38] = 0,88 / 0,62 = \mathbf{1,42}$$

Wniosek 2. Sprzęganie równoległe wielu elementów w jednym KDMZ daje również podobny efekt jak podano we wniosku 1.

Nośność i niezawodność najmniejszych KDMZ występujących w koncepcjach energoaktywnych segmentów dylatacyjnych przekrytych strukturą zredukowaną z co drugim oczkiem pustym występują KDMZ o liczebności $n = 6$ elementów sprzężonych w jednym KDMZ. W tym przypadku zwiększenie nośności dla $v_1 = 0,06$ wynosi:

$$N_k/nN_{ik} = [1 - 3,8v_1 / 2,4495] / [1 - 3,8v_1] = 0,9069 / 0,772 = \mathbf{1,175}$$

Zwiększenie nośności **6** elementów sprzężonych w MKZ elementów wynosi: $N_k/nN_{ik} = \mathbf{1,175}$. Takie zwiększenie nośności (powyżej zaleceń normowych [2]) również kompensuje zmniejszenie nośności wywołane wirtualnym szeregowym połączeniem wszystkich elementów występujących w analizowanej konstrukcji.

W przypadku wykonania elementów konstrukcji gorszej jakości np. o współczynniku $v_1 = \mathbf{0,09}$ uzyskuje się również pozytywny wynik.

W tablicy 1 zamieszczono współczynniki zwiększenia nośności w przypadku sprzężenia od $n = 2$ do $n = 16$ elementów w jednym MKZ.

Tabela 1. Oczekiwane zwiększenie nośności KDMZ zawierającego od 2 do 16 elementów

Lp.	v_1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	n=7	n=8	n=9	n=12	n=16
1	0,06	1,087	1,125	1,148	1,163	1,175	1,184	1,191	1,197	1,210	1,222
2	0,07	1,106	1,153	1,181	1,200	1,214	1,225	1,234	1,242	1,258	1,272
3	0,08	1,128	1,185	1,218	1,241	1,259	1,272	1,282	1,291	1,311	1,328
4	0,09	1,152	1,220	1,260	1,287	1,308	1,323	1,336	1,347	1,370	1,390
5	0,10	1,180	1,259	1,307	1,339	1,363	1,383	1,396	1,409	1,436	1,460

5. Podsumowanie.

W pracy zwrócono uwagę na ważność zagadnienia sprzęgania elementów sprawczych w KDMZ konstrukcji metalowych hal zawierających większą liczbę elementów sprawczych. Konstrukcje hal charakteryzują się dużą powierzchnią ścian i przekryć dachowych nadającą się do zagospodarowania w celu pozyskiwania energii cieplnej i elektrycznej z promieniowania słonecznego. Wiąże się z tym zwiększenie obciążenia termicznego konstrukcji i kosztów wykonania konstrukcji. Z analizy związanych z tym zagadnień wynikała możliwość zredukowania obciążenia termicznego do poziomu obciążeń konstrukcji konwencjonalnych w drodze podziału konstrukcji na energoaktywne segmenty dylatacyjne. W realizacji tej idei wzięto też pod uwagę możliwość takiego sprzęgania elementów konstrukcji, który pozwala na wymiarowanie elementów konstrukcji na podstawie norm, bez konieczności [8] wyrównywania nośności i niezawodności konstrukcji zawierających dużą liczbę statycznie wyznaczalnych elementów sprawczych, w których zachodzą połączenia szeregowe z punktu widzenia niezawodności.

Konstrukcje hal przekrytych strukturami dają się korzystnie podzielić na energoaktywne segmenty dylatacyjne, w których dostateczna liczba elementów sprawczych daje się sprzęgać w KDMZ zwiększając nośność i niezawodność konstrukcji powyżej oczekiwań [2] normowych.

Literatura

- 1 PN-EN 1991-1-5:2005, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-5: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania termiczne.
- 2 PN-EN 1990:2004, Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.
- 3 Kowal Z., Szychowski A., Energoaktywne struktury przestrzenne. Inżynieria i Budownictwo 1 (1993), s. 3-5.
- 4 Kowal Z., Piotrowski R., Szychowski A., Przystosowanie hal przekrytych strukturą do pozyskiwania energii z promieniowania słonecznego. ZNPR nr 283, Z. 59 (2/2012/II), s. 431-438.
- 5 PN-90/B-03200, Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- 6 Kowal Z., Probabilistyczna optymalizacja nośności słupów konstrukcji hal konwencjonalnych. ZNPR nr 283, Z. 59 (2/2012/II), s. 185-192.
- 7 Kowal Z., Probabilistic Optimisation of the Bearing Capacity of Conventional Hall Coverings. Probabilistyczna optymalizacja nośności konstrukcji przekryć hal konwencjonalnych. Structure and Environment, nr. 3 (2011), s. 10-19.
- 8 Kowal Z., On Adjusting the Load Bearing Capacity of Decisive Members to Reliability Classes of Statically Determinate Complex Structures. Archives of Civil Engineering, LIX, 1, 2013, s.132-142.

- 9 PN-EN 1993-1-1:2006, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
10 Tablice statystyczne rozkładu normalnego.

Energy-active expansion segments of halls with structural covers

Zbigniew Kowal, Rafał Piotrowski¹

¹ *Department of Mechanics, Metal Structures and Computer Methods,
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology,
e-mail: zbigko@tu.kielce.pl, rafalp@tu.kielce.pl*

Abstract: The paper presents the results of developing a concept of economical energy-active expansion segments for large-volume halls, in which: 1) structural coverings were used, 2) thermal impacts on forces and displacements were reduced to conventional values stated in the code [1], 3) load bearing capacity and reliability, greater than those recommended for RC2 class structures, were maintained [2], 4) the static scheme was selected in such a way so that failure-causing thermal impacts would not affect the reliability of the hall expansion segments. The effect was obtained by detaching the beam kinematically admissible failure mechanism from the tilt kinematically admissible failure mechanism of separate energy-active expansion segments of the hall.

Keywords: energy-active hall segments, steel structures.