

Energoaktywne segmenty dylatacyjne hal przekryte strukturą regularną ze ściągiem

Zbigniew Kowal¹, Rafał Piotrowski²

^{1,2} *Katedra Mechaniki Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, e-mail: ¹zbigko@tu.kielce.pl, ²rafalp@tu.kielce.pl*

Streszczenie: W pracy pokazano koncepcję konstrukcji energoaktywnych segmentów hal przekrytych strukturą ze ściągiem, zawierających absorbery energii promieniowania słonecznego (ES). Wzięto pod uwagę: 1) spadki połączy powyżej 20% umożliwiające samooczyszczanie powierzchni pokrycia ze śniegu [9,14] i zwiększenie pozyskiwania energii w okresie zimowym; 2) zredukowanie do $6 \times 3 = 18\text{m}$ szerokości energoaktywnych segmentów dylatacyjnych; 3) zmniejszenie wpływów termicznych na siły wewnętrzne i przemieszczenia elementów konstrukcji [11]; 4) sprzężenie równoległe elementów konstrukcji w celu zachowania nośności i niezawodność [3] powyżej zalecanej w klasie RC2 [10]; 5) podział konstrukcji przekrycia na geometrycznie niezmiennicze segmenty montażowe hali, umożliwiające sprawny i bezpieczny montaż.

Słowa kluczowe: energoaktywne segmenty hal, struktury metalowe, samooczyszczanie pokrycia, niezawodność konstrukcji

1. Wprowadzenie

W pracy przedstawiono koncepcję oddylatowania w konstrukcji hali energoaktywnych segmentów dylatacyjnych o minimalnej szerokości $6 \times 3 = 18\text{m}$, m. in. ze względu na zewnętrzne jak i wewnętrzne oddziaływania termiczne. Minimalną długość segmentu wyznaczono z warunku dotrzymania nośności i niezawodności konstrukcji określonej w normie [10]. Wprowadzono energoaktywne segmenty dylatacyjne w wielkopowierzchniowej hali, biorąc pod uwagę spadki przekrycia $\geq 20\%$ ($\alpha > 10^\circ$) (rys. 1a), umożliwiające samoczynne zsuwanie się śniegu z połączeń dachowych [9,14]. Segmenty dylatacyjne przekryto strukturą regularną (przegubowo opartą na słupach) ze ściągiem (rys. 1a) zmniejszającym masę konstrukcji przekrycia. Przewidziano dwa warianty połączenia przekrycia w kluczu, przegubowe i sztywne. W połączeniu przegubowym przewidziano możliwość blokowania ruchu obrotowego w węźle szczytowym (w kluczu), co umożliwia podnoszenie w całości segmentu montażowego przekrycia wraz ze ściągiem w celu osadzenia go na słupach.

Wybrano strukturę o regularnej siatce prętów w obu warstwach, dolnej i górnej, o oczkach $a \times a$ (np. $a = 3\text{m}$), w której pręty dolne (wzdłuż hali) mogą być wykorzystane do podpierania absorberów i wyposażenia.

Biorąc pod uwagę losowe wpływy zmniejszające zdolność przekrycia do samooczyszczania, zaproponowano minimalne projektowe nachylenie samoczyszczających połączeń $\tan \alpha \geq 0,2$ ($\alpha > 10^\circ$) oraz stosowanie ściąгов ze stali profilowej, a nie lin, w celu zmniejszenia wzajemnych przemieszczeń węzłów podporowych przekrycia (głowic słupów) [8].

W koncepcji podziału hali na segmenty dylatacyjne wzięto pod uwagę zastosowanie segmentów typowych jak i energoaktywnych. Rozmieszczenie energoaktywnych segmentów

jest wariantowe, tzn. uzależnione od potrzeb energetycznych hali. Ich długość dobrano biorąc pod uwagę zmniejszenie wydłużenia termicznego Δ_T po długości L_d ergoaktywnego segmentu dylatacyjnego hali spowodowanego awaryjną temperaturą (powinno być mniejsze od normowego wydłużenia hali konwencjonalnej). Z drugiej strony ograniczenie długości jest limitowane nośnością i niezawodnością segmentu. W środku długości ścian podłużnych segmentu dylatacyjnego zastosowano ostojowe stężenia słupów. Parametry obciążenia temperaturą oszacowano dla średniej wysokości $H = 173\text{m}$ powierzchni Polski n.p.m.. Maksymalna temperatura powietrza w cieniu wg [11] wynosi $T_{max}(H) \approx 37^\circ\text{C}$. Temperatura ciemnego pokrycia hali na stronie południowo-zachodniej jest większa o $T_s = 42^\circ\text{C}$. Łącznie temperatura obudowy może osiągnąć $T_{tot} = 79^\circ\text{C}$. W zimie temperatura powietrza osiąga $T_{min}(H) \approx -31,6^\circ\text{C}$. Założono, że awaryjna temperatura konstrukcji zawierającej absorbery w segmencie dylatacyjnym nie przekroczy $+100^\circ\text{C}$. Jako asekurację przed przegrzaniem konstrukcji przewidziano automatyczne włączanie transportu ogrzanego powietrza do odbiorników lub magazynów EC za pomocą wentylatorów ssąco - tłoczących przy przekroczeniu umownej temperatury nagrzewanego powietrza rzędu, np. powyżej $+20^\circ\text{C}$ [7].

Liczbę i nośność ściąгов wydzielonego segmentu dylatacyjnego hali dostosowano do niezawodności klasy RC3 [10], określonej wskaźnikiem niezawodności $t = \beta = 4,3$. Geometrycznie niezmienną konstrukcję ergoaktywnego segmentu dylatacyjnego hali złożono z geometrycznie niezmiennych segmentów montażowych szerokości $2a$ umożliwiających bezpieczny montaż oraz optymalizację czasu i kosztów montażu konstrukcji hali.

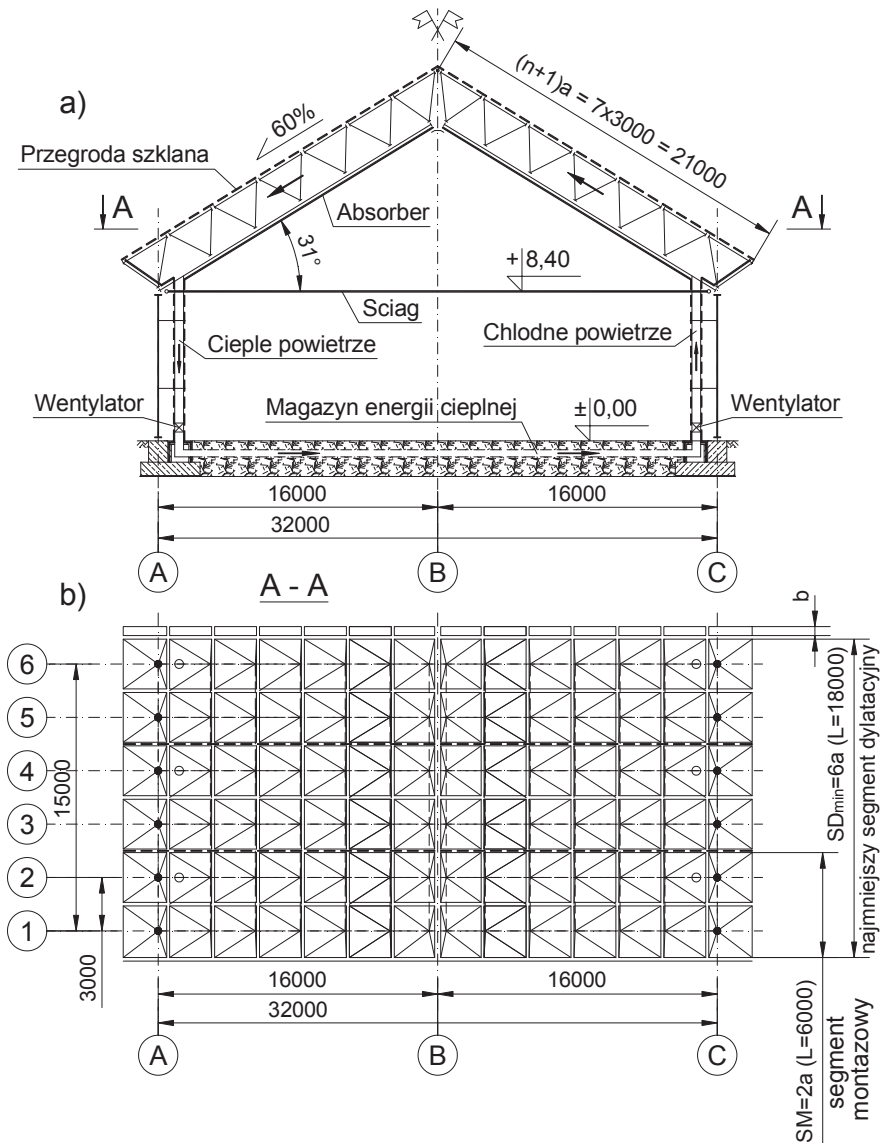
2. Koncepcja ergoaktywnych segmentów przekrytych strukturą regularną

Na rysunku 1 oraz 2 pokazano przykładową koncepcję wydzielenia ergoaktywnych segmentów hali długości $L = 90\text{m} + 4b$ (gdzie: b – odstęp między segmentami). Strukturę regularną (np. $a = 3\text{m}$) ze ściągami podzielono na segmenty dylatacyjne długości $L_d = 6a = 18\text{m}$. Spadek połączy ukształtowano dodatkowym modułowym oczkiem $(n+1)a$, co przy rozpiętości $L = 32\text{m}$ dało nachylenie rzędu $\alpha = 30^{\circ}58'$ (rys. 1a).

Przykładową halę podzielono na 5 segmentów dylatacyjnych długości $L_d = 18\text{m}$ każdy (rys. 2). W przedstawionej koncepcji rozmieszczono naprzemiennie tradycyjne oraz ergoaktywne segmenty dylatacyjne. Liczba segmentów ergoaktywnych zależy od bilansu zagospodarowania energetycznego hali.

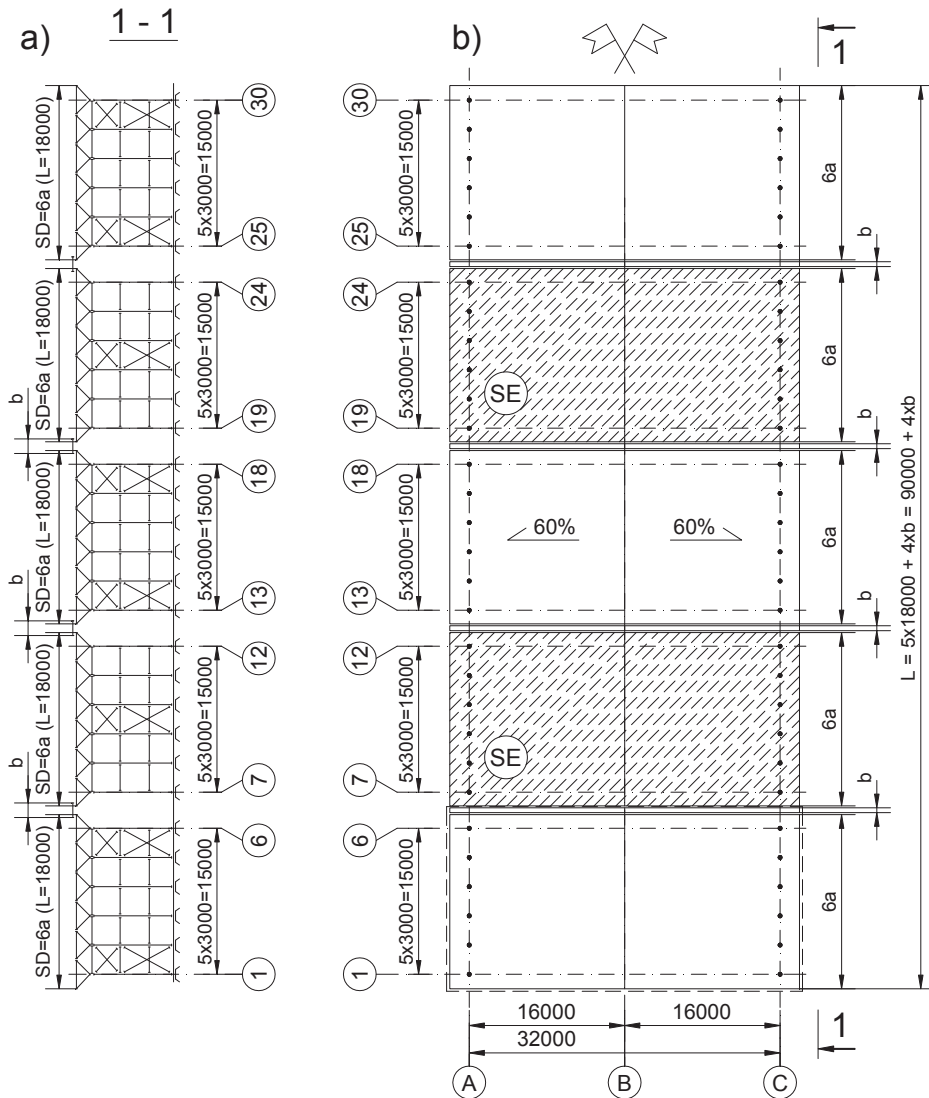
W środku ścian podłużnych (rys. 2a) każdego ergoaktywnego segmentu dylatacyjnego, umieszczono stężenia ostojowe (główne) umożliwiając symetryczne wydłużenie segmentu pod wpływem temperatury. Tradycyjne segmenty stężono w polach skrajnych ścian podłużnych (rys. 2a). Słupy rozmieszczono zgodnie z rozstawem węzłów dolnych struktury ($a = 3\text{m}$). Rygle ścian podłużnych korzystnie rozmieszczono w odstępie modułowym, zgodnym z modułem obudowy ścian.

Segmenty montażowe składane są na poziomie terenu z elementów wysyłkowych postaci odwróconych piramid prętowych w piramidowo bocznym systemie montażowym [1]. Przygotowane segmenty montażowe o szerokości $2a$ mają masę około 10.000kg (zależnie od rozpiętości i pokrycia). Segmenty montażowe łączone ściągiem w węzłach skrajnych pasa dolnego po zablokowaniu przegubów, mogą być podnoszone i osadzone na 4 słupach ścian podłużnych stycznie do sąsiednich segmentów montażowych, tworząc blisko gałęziowe pasy górne łączone na śruby. Sąsiadujące węzły dolne łączone są prętami dolnymi również na śruby.



Rys. 1. Segment dylatacyjny hali przekrytej strukturą regularną ze ściągiem: a) przekrój poprzeczny hali, b) podział minimalnego segmentu dylatacyjnego na segmenty montażowe

Wydzielony minimalny segment energoaktywny, składający się z 3 segmentów montażowych, szerokości $L_d = 3 \times 2a = 6a = 18\text{m}$ (rys. 1b) spełnia zalecenia wskaźnika niezawodności konstrukcji [10] i wynosi powyżej $t = \beta > 4,3$. Niezawodność kinematycznie dopuszczalnego mechanizmu zniszczenia (KDMZ) konstrukcji minimalnego segmentu energoaktywnego postaci wiązki ściągiów sprawdzono w p. 3.



Rys. 2. Przykład podziału hali na segmenty dylatacyjne: a) rozmieszczenie stężeń między słupami jednoogłazowymi, b) rzut energoaktywnych (SE) oraz tradycyjnych segmentów dylatacyjnych

3. Nośność i niezawodność minimalnego segmentu dylatacyjnego

W pracy [8] pokazano globalnie kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia (KDMZ), mogące wystąpić w omawianym typie konstrukcji. Spośród przedstawionych, najmniejszym jest KDMZ wiązki ściągów, którego wirtualnym skutkiem może być globalna katastrofa rozpatrywanego segmentu dylatacyjnego.

Na podstawie probabilistycznej analizy niezawodności konstrukcji [2,3,4,5], wystarczające jest złożenie energoaktywnego segmentu dylatacyjnego z 3 geometrycznie niezmiennych segmentów montażowych (rys. 1b) o łącznej szerokości $L_{d,min} = 6a = 18\text{m}$. W takich segmentach występuje wiązka $m = 6$ cięgien.

W pracy [8] przeanalizowano niezawodność ściągu, złożonego z 7 elementów sprawczych klasy RC2 połączonych szeregowo. Oszacowano wskaźnik niezawodności pojedynczego ściągu ($t_s = 3,28696$) oraz współczynnik dostrojenia nośności ściągu ($s = 1,178$) do klasy RC3 ($t_s = \beta = 4,3$) [10].

W niniejszym opracowaniu założono, że wskaźnik niezawodności ściągu jest dostrojony wg [2] do niezawodności równoważnej wskaźnikowi niezawodności $t_2 = \beta = 3,8$. Niezawodność wyodrębnionego ściągu, jako elementu sprawczego, wynosi wówczas $p_1 = 0,999927652$ [13], natomiast awaryjność ściągu $q_1 = 1 - p_1 = 0,000072348$.

Uwaga: W przypadku ściągow zastosowanych w pracy proponuje się stosować współczynnik dostrojenia nośności ściągu do nośności klasy RC3 ($\beta = 4,3$) z uwagi na rozmiar konsekwencji zniszczenia w przypadku wystąpienia KDMZ ściągow. Znając wskaźnik niezawodności $t_2 = \beta = 3,8$ ściągu można oszacować współczynnik dostrojenia nośności pojedynczego ściągu (dla współczynnika zmienności nośności $v_1 = 0,1$) do nośności klasy RC3 ze wzoru (1) [2]:

$$s = \frac{1 - t_2 \cdot v_1}{1 - t_3 \cdot v_1} = \frac{1 - 3,8 \cdot v_1}{1 - 4,3 \cdot v_1} = \frac{0,62}{0,57} = 1,088 \quad (1)$$

Dostrajamy ściągi zaprojektowane dla klasy RC2 ($t_2 = \beta = 3,8$) do klasy RC3 ($t_3 = \beta = 4,3$) z uwagi na rozmiar konsekwencji zniszczenia ściągow w przypadku małej sztywności przekrycia sprzęgającego cięgna w głowicach słupów.

Wniosek. Obliczeniową nośność ściągu należałoby zwiększyć 1,088 razy w celu dostrojenia ściągu do niezawodności klasy RC3. Tak należy postępować zwłaszcza w przypadku przekryć wiązarowo-płatwiowych nie zaopatrzonych w system stężeń podłużnych sprzęgających przemieszczenia poziome głowic słupów.

W przypadku rozpatrywanego przekrycia strukturą bez przegubu kalenicowego, zdolną do wyrównywania wydłużenia ściągow aż do granicy nośności KDMZ, nośność zbioru 6 przykładowych ściągow ulegnie zwiększeniu. W tym konkretnym przypadku należy zwrócić uwagę na asekurację przed niesymetrycznym mechanizmem zniszczenia. W związku z tym należy zastosować asekurację fizyczną w drodze zablokowania przegubów w kluczu przekrycia oraz asekuracją w drodze zmniejszenia liczby (tylko we wzorze) elementów sprzężonych. W przypadku $n = 6$ równolegle sprzężonych ściągow kwantyl nośności (nośność obliczeniową) można bezpiecznie oszacować redukując liczbę sprzężonych elementów do $n_0 = n - 2 = 4$. Kwantyl nośności ściągow oszacujemy wtedy ze wzoru (2) [3]:

$$N_k = n_0 E(N_1) \left[1 - t_2 \cdot \frac{v_1}{\sqrt{n_0}} \right] = 4 E(N_1) \left[1 - t_2 \cdot \frac{v_1}{2} \right] \quad (2)$$

gdzie: n_0 – zredukowana liczba elementów sprawczych, $E(N_1)$ – nośność oczekiwana (średnia) pojedynczego ściągu, $t_2 = 3,8$ – wskaźnik niezawodności ściągu, $v_1 = D(N_1) / E(N_1)$ – współczynnik zmienności nośności ściągu.

Zwiększenie nośności s_n , możemy oszacować z wzoru (3) wg [3,5]:

$$s_n = \frac{N_k}{n N_{1k}} = \frac{1 - t_2 \cdot \frac{v_1}{\sqrt{n_0}}}{1 - t_2 \cdot v_1} \quad (3)$$

Przykład. Oszacować nośność i niezawodność zredukowanej wiązki $n_0 = n - 2 = 4$ ściągow. Wskaźnik niezawodności pojedynczego ściągu wynosi $t_2 = 3,8$. W przykładzie

przyjęto współczynnik zmienności nośności elementów $v_1 = 0,1$. Zwiększenie nośności ściągow wynosi:

$$s_4 = \frac{1 - t_2 \cdot \frac{v_1}{\sqrt{n_0}}}{1 - t_2 \cdot v_1} = \frac{1 - 3,8 \cdot \frac{0,1}{\sqrt{4}}}{1 - 3,8 \cdot 0,1} = \frac{0,81}{0,62} = 1,306$$

Wniosek. Nośność 4 ściągow wskutek ich równoległego dostatecznie sztywnego sprzężenia powiększa się 1,306 razy. W tym przypadku, zwiększenie nośności ciągu w wiązce 4 ciągów ($n_0 = n - 2 \geq 4$) jest większe, aniżeli zmniejszenie nośności odrębnych ściągow w klawiszujących wiązarach nawet o wskaźniku niezawodności $t_3 = 4,3$ większym od przyjętego w przykładzie $t_2 = 3,8$. Przy równoległym sprzężeniu ściągow wynikającym ze sztywności konstrukcji przekrycia w płaszczyźnie poziomej uzyskujemy nośność większą w porównaniu do sumy z nośności odrębnych ściągow.

4. Podsumowanie, uwagi, wnioski

Konstrukcje hal o rozdzielonych KDMZ przekrycia i słupów charakteryzują się dużą powierzchnią ścian i przekryć dachowych i nadają się do zagospodarowania w celu pozyskiwania energii cieplnej oraz elektrycznej z promieniowania słonecznego. Wiąże się z tym zwiększenie obciążeń wyposażeniem oraz obciążeniem termicznym konstrukcji. Zwiększa to koszty wykonania konstrukcji konwencjonalnych. Z analizy statycznej wynika możliwość zredukowania obciążenia termicznego do poziomu obciążeń konstrukcji konwencjonalnych w drodze wydzielenia w halach energoaktywnych segmentów dylatacyjnych o szerokości $3x2a$.

Przedstawiono koncepcję wydzielenia energoaktywnych segmentów dylatacyjnych hali, zawierających absorbery i umożliwiających transport energii cieplnej. Rozmieszczenie i liczba energoaktywnych segmentów uzależniona jest od potrzeb energetycznych inwestora.

Do oszacowania nośności i niezawodności segmentów energoaktywnych określono i przyjęto najmniejszy KDMZ. Oszacowano współczynnik dostrojenia nośności ściągow (do niezawodności klasy RC3), w funkcji przykładowego współczynnika zmienności nośności $v_1 = 0,10$. Oszacowanie niezawodności za pomocą algebry kwantyli wykazało, że asekurowane równoległe, sprzężenie elementów sprawczych o liczebności MKZE $n \geq 4$, za pomocą instrumentów probabilistycznej optymalizacji konstrukcji [3], pozwala na uniknięcie potrzeby dostrojenia nośności i niezawodności elementów konstrukcji hal do zalecanych klas niezawodności w drodze zwiększenia masy konstrukcji [2].

Z oszacowań wynika, że zaproponowane na podstawie probabilistycznej optymalizacji koncepcje konstrukcji energoaktywnych segmentów dylatacyjnych spełniają normowe zalecenia nośności i niezawodności konstrukcji zwymiarowanych wg norm przedmiotowych [10,11,12].

Dodatkową redukcję wpływu temperatury na konstrukcję można uzyskać stosując podkładki neoprenowe nad głowicami słupów w węzłach podporowych [6]. W takim przypadku należy sprzęgać ściągami węzły dolne struktury.

Wydzielenie energoaktywnych segmentów w halach konwencjonalnych (wiązarowo-płatwiowych), wymaga przekształcenia ich w ruszt kratowy. Taki ruszt z poziomym stężeniem wzdłuż głowic słupów umożliwia zainstalowanie absorberów i urządzeń w przestrzeni konstrukcyjnej energoaktywnego segmentu hali.

Wnioski generalne:

W konstrukcjach hal przekrytych strukturami można korzystnie wydzielić energoaktywne segmenty dylatacyjne, w których sprzężenie trzech segmentów montażowych umożliwia zwiększenie nośności i niezawodności konstrukcji powyżej zaleceń podanych w podstawowej normie [10].

Warto zwrócić uwagę na sposób wyznaczania tak zwanych **współczynników konsekwencji zniszczenia** konstrukcji budowlanych w tym stalowych. Wyrażenie współczynników konsekwencji zniszczenia konstrukcji za pomocą wskaźników niezawodności $t = \beta$ lepiej odzwierciedla odporność konstrukcji na awarie lub katastrofy.

Praca w ramach Projektu pt. „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”, temat 7.4: KONSTRUKCYJNE ROZWIĄZANIA ENERGOAKTYWNYCH PRZEKRYĆ BUDOWLANYCH PRZYSTOSOWANYCH DO POZYSKIWANIA ENERGII CIEPLNEJ. Umowa nr: POIG.01.01.02-10-106/09.

Literatura

- 1 Poradnik projektanta Konstrukcji Metalowych. Tom 2., praca zbiorowa pod kierownictwem prof. W. Boguckiego, Arkady, Warszawa, 1982.
- 2 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.
- 3 Kowal Z., Instruments of Probabilistic Optimisation of Load Bearing Capacity and Reliability of Statically Indeterminate Complex Structures. Archives of Civil Engineering, LX, 1, 2014, s. 77-90.
- 4 Kowal Z., Probabilistyczna optymalizacja nośności słupów konstrukcji hal konwencjonalnych. ZNPR nr 283, Z. 59 (2/2012/II), s. 185-192.
- 5 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.
- 6 Kowal Z., Brzezińska K., Wpływ temperatury na kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia energoaktywnych segmentów hali. Praca przyjęta na konferencję ZK2014 – Suchedniów 2014.
- 7 Kowal Z., Piotrowski R., Energoaktywne segmenty dylatacyjne hal z przekryciem strukturalnym. BiA PL Vol. 12(2) 2013, s.221-228.
- 8 Kowal Z., Piotrowski R., Asekurowany segment energoaktywny hali przekryty strukturą zredukowaną ze ściągiem. Praca przyjęta na konferencję ZK2014 – Suchedniów 2014.
- 9 Kowal Z., Siedlecka M., Energoaktywne segmenty samoczyszczącego przekrycia hali. EAB, XXI OIKNT, Bielsko-Biała 10-12.10.2013, s. 161-168.
- 10 PN-EN 1990:2004, Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.
- 11 PN-EN 1991-1-5:2005, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-5: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania termiczne.
- 12 PN-EN 1993-1-1:2006, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- 13 Tablice statystyczne rozkładu normalnego.
- 14 Materiały informacyjno – reklamowe Pilkington Polska Sp. z o. o.

Energy–active expansion segments of steel halls covered with a regular structure with a tie

Zbigniew Kowal¹, Rafał Piotrowski²

^{1,2} *Department of Mechanics, Metal Structures and Computer Methods, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e-mail: ¹zbigko@tu.kielce.pl, ²rafalp@tu.kielce.pl*

Abstract: The paper presents the concept of energy-active segments construction of steel halls covered with a structure with a tie which contain solar radiation energy absorbers (SE). The following factors were taken into account: 1) slope exceeding 20%, which enables self-clearance of snow from the cover surface and facilitates obtaining energy in the winter period; 2) reducing the width of energy-active expansion segments to 6x3=18m; 3) reducing thermal impact on internal forces and displacements of the structure elements; 4) parallel coupling of the structure elements to maintain load bearing capacity and reliability [2] above these recommended for RC2 class [3]; 5) dividing the cover structure into geometrically invariable assembly segments of the hall, which ensures safe and efficient assembly.

Keywords: energy active segments of steel halls, metal structures, the cover self-clearance, structure reliability