

KAROLINA BRZEZIŃSKA<sup>1</sup>  
ZBIGNIEW KOWAL<sup>2</sup>

Kielce University of Technology

<sup>1</sup>email: k.brzezinska@tu.kielce.pl

<sup>2</sup>email: zbigko@tu.kielce.pl

# IMPACT OF TEMPERATURE ON KINEMATICALLY ADMISSIBLE FAILURE MECHANISMS OF ENERGY-ACTIVE SEGMENTS OF STEEL HALLS

## Abstract

The paper analyses the impact of temperature on kinematically admissible failure mechanisms (KAFMs) of energy-active segments of steel halls. The static scheme of segment construction allows the separation of tilt and beam KAFMs and makes it possible to use the probabilistic optimisation of energy-active segments of steel halls. It also allows an optimal division of the structure into the shipment elements and assemblies, and a reduction in thermal impact due to the use of neoprene spacers in the column heads. It was shown that the rational solutions reduce the thermal action on the strain of decisive elements in KAFMs. Additionally, rational coupling of decisive elements in KAFMs increases capacity and reliability of the segments above those recommended in the code [6].

**Keywords:** temperature impact, kinematically admissible failure mechanisms (KAFMs), energy-active segments of steel halls

## 1. Introduction

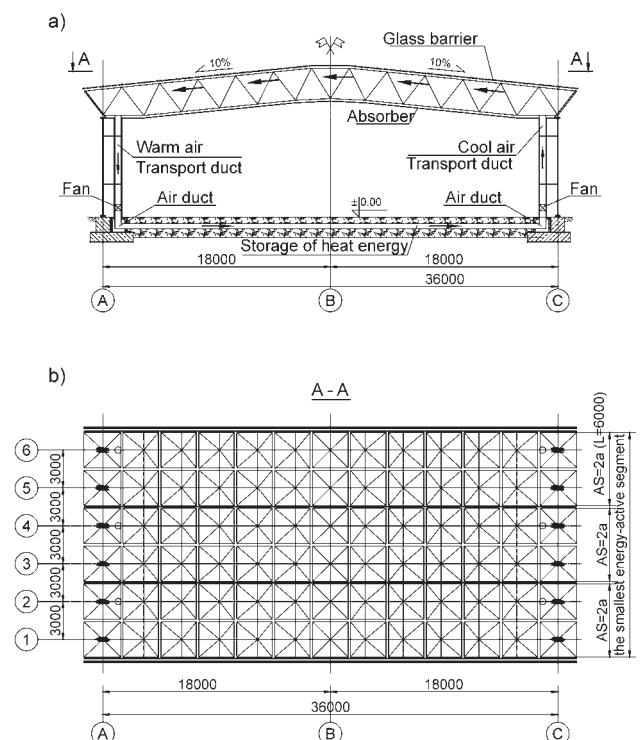
In the work on the project, a number of issues were encountered, which are not found in commonly used steel halls designs. Those include: 1) the function of thermal energy (TE) extraction from solar radiation, 2) TE transport by means of warm air to the sites where it can be used or stored, 3) location of TE absorbers, 4) securing the load bearing structure against overheating.

The steel hall division into energy-active segments makes it possible to switch off segments when excess TE is produced, and to switch them on when TE deficit needs to be compensated.

The selected geometry of the structure also facilitates the failure ventilation of the structure interior, and also the replacement of solar installations and other devices.

The capacity and reliability of the structure was validated using a computational model of the smallest energy-active segment of the hall, shown in Figure 1. The separation of the structure into global KAFMs: the tilt KAFMs of columns and the beam KAFMs of the cover, facilitates the probabilistic optimisation of capacity and reliability of the steel hall energy-active segments. In this way it is possible to increase the

structure capacity and reliability without bearing investment costs.



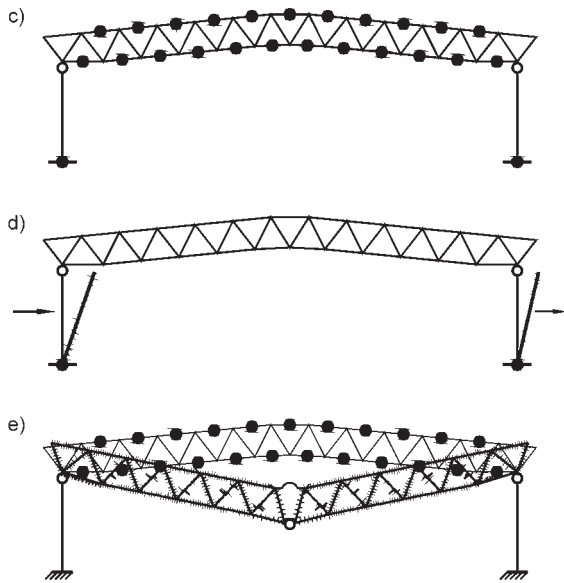


Fig. 1. Steel hall segment covered with a regular structure: a) hall cross-section, b) projection of the smallest energy-active segment [1], c) notation of the segment KAFM, d) tilt KAFM, e) beam KAFMs

## 2. Temperature impact on KAFM of the structure energy-active segments

The analysis of KAFM (Fig. 1c) of the structure segments was shown on the example of a single-bay steel hall, which has a span of  $L = 36$  m. Geometry and element sections were designed in accordance with the *Zachód* system [2]. Column-to-foundation rigid connections and pin support on columns in the bottom nodes of the cover structure were assumed.

## 3. Load compensation

In Figure 2, extreme combinations of the steel hall loads and displacements are shown: a) case 1 scenario (Fig. 2a) shows displacements under the following loads: permanent, snow, and wind (load on columns: assumed wind pressure =  $2.55$  kN/m, uplift pressure =  $-1.15$  kN/m), and sub-zero temperature in the bottom chord, b) case 2 scenario (Fig. 2b) shows displacements under the following loads: permanent, wind and failure temperature of  $+100^\circ\text{C}$  in the bottom chord. High temperature inside the hall reduces or eliminates the snow load on energy-active segments. The broken line indicates the structure displacements (mm) due to different load combinations.

The use of pin support of the cover leads to the reduction in extreme forces in the structure members. In case 2 scenario (Fig. 2b), the column is 4% less strained, and the normal force in the column is approx. 30% lower when compared with load case

1 (Fig 2a). For case 2, the load of the bottom chord was reduced by over 40% in comparison with case 1. Because of the wind action and high above-zero temperature, the structure displacements increase, but forces in the KAFM elements do not. When the structure probabilistic optimisation by coupling decisive elements in independent global KAFMs is applied, the expansion segments can be dimensioned in accordance with particular standards without the necessity to increase the capacity of elements.

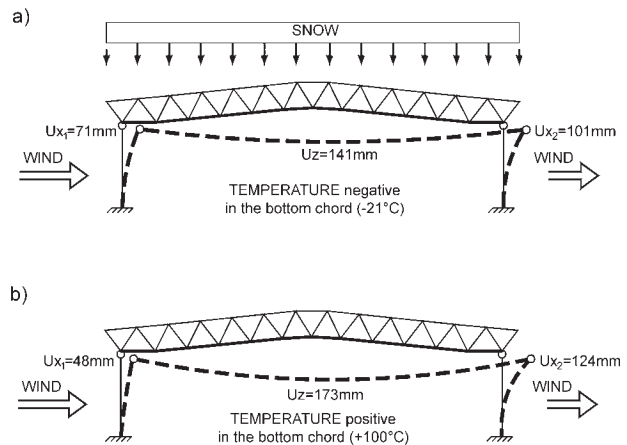


Fig. 2. Horizontal ( $U_x$ ) and vertical ( $U_z$ ) displacements under extreme load combinations

## 4. Use of elastomeric spaces

When high temperature TE absorbers are used, it is possible to lower the impact of temperature on the structure strain by means of compensation spacers in column heads. Elastomeric spacers help to offset displacements and dimensioning deviations of column heads, and they decrease the column maximum strain [3].

Table 1. Horizontal displacements of column heads  
 $U_i = u_i \pm 20$  mm

l	$u_{1,i}$ [mm]	$u_{2,i}$ [mm]	$\delta_u$ [mm]	$U_{1,i}$ [mm]	$U_{2,i}$ [mm]
1	65	107	$\pm 20$	85	87
2	67	105	$\pm 20$	87	85
3	48	124	$\pm 20$	68	104
4	71	101	$\pm 20$	91	81

where: load combinations: 1 – wind from the left + snow, 2 – wind from the left + sub-zero temp. in the bottom chord, 3 – wind from the left+above zero temp. in the bottom chord, 4 – wind from the left + sub-zero temp. in the bottom chord

Table 1 shows horizontal displacements of column heads before ( $u_{j,i}$ ) and after ( $U_{j,i}$ ) the use of elastomeric spacers. The highest column strain is found for two combinations of permanent, snow, wind loads and sub-zero temperature, and not for above zero (failure) temperature. In all other load cases, minor differences in left and right column deformations are found (of the order of 2% for  $i = 1$ ,  $i = 2$  and max. 11% for  $i = 4$ ).

### 5. Estimation of the reliability of the steel hall energy-active segment KAFM

For truss-purlin covers of expansion segments, rigid roof braces along the columns and rigid transverse braces between trusses should be used. In practice, that leads to the construction of grille-bar covers, due to, among others, the support of the equipment in the lower space of the expansion segment structure.

When the cover forms a structure, the trend towards decreasing the computational capacity of the elements of the cover and columns is reversed into the trend towards increasing the capacity and reliability of the segment KAFM. For instance, quantile  $N_k$  of the capacity of the weakest KAFM of  $m$  tensioned bottom chords of the segment can be estimated from formula (1) in accordance with [4]:

$$N_k = m E(N_1) - t D(N) m^{0.5} = m E(N_1) [1 - t v_1 / m^{0.5}] \quad (1)$$

where:  $E(N_1)$  – mean capacity of bottom chord elements,  $t = \beta = 3.8$  – recommended reliability index [6],  $v = D(N_1)/E(N_1)$  – coefficient of element variation,  $D(N_1)$  – standard deviation of the elements.

Studies [4, 5] indicate that the quantile of capacity (equivalent to the computational capacity) of  $m > 4$  members, coupled in parallel, is greater than a decrease in the quantiles of the capacity of statically determinate trusses composed of 69 decisive elements (23 bars and 46 joints).

### 6. Summary

In the selected static concept, two global and virtually independent groups of KAFMs, which couple a minimum of six decisive elements, are found. The concept satisfies the requirements on the structure reliability stated in [6, 7] without the necessity to increase the capacity of elements.

The concept of energy-active segments of steel halls makes it possible to safely adapt the structure of the steel halls to effective and active extraction of TE from solar radiation.

Covering the steel hall segment with a regular structure or one with every other mesh empty has sufficient cover horizontal rigidity to couple columns into one tilt failure mechanism. The division of energy-active expansion segments into geometrically invariable assemblies allows convenient and fast assembly of the segments of the steel hall.

### References

- [1] Kowal Z., Piotrowski R., *Energoaktywne segmenty dylatacyjne hal z przekryciem strukturalnym*, BiA PL Vol. 12(2), 2013, pp. 221-228.
- [2] Kowal Z., Polak M., Szpila E., Wydra S., *Prętowe przekrycia przestrzenne hal przemysłowych o rozpiętości 18; 24; 30 i 36 m w systemie „Zachód”*, Inżynieria i Budownictwo 3/1977, pp. 82-86.
- [3] Betomax, katalog produktów firmy, *Podkładki elastomerowe*.
- [4] Kowal Z., *Instruments of probabilistic optimisation of load bearing capacity and reliability of statically indeterminate complex structures*, Archives of Civil Engineering, LX, 1, 2014.
- [5] 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, pp. 132-142.
- [6] PN-EN 1990:2004, Eurokod: *Podstawy projektowania konstrukcji*.
- [7] PN-EN-1993-1-1:2005+AC:2006. *Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.

Karolina Brzezińska  
Zbigniew Kowal

# Wpływ temperatury na kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia energoaktywnych segmentów hal

## 1. Wprowadzenie

W toku realizacji pracy ujawniono wiele zagadnień niewystępujących w powszechnie stosowanych rozwiązaniach konstrukcji hal. Należą do nich: 1) funkcja pozyskiwania energii cieplnej (EC) oraz energii elektrycznej (EE) z energii promieniowania słonecznego (ES), 2) transport EC za pośrednictwem ogrzanego powietrza do miejsc użytkowania bądź magazynowania EC, 3) rozmieszczenie absorberów EC i EE, 4) asekuracja przed lokalnym przegrzewaniem elementów konstrukcji nośnej.

Podział hali na segmenty energoaktywne pozwala na wyłączenie energoaktywnych segmentów hal w okresach nadmiaru ES i włączanie w okresach deficytu ES.

Wybrana w pracy [1] geometria energoaktywnych segmentów konstrukcji hal sprzyja również rozwiązaniu awaryjnej wentylacji wnętrza konstrukcji i wymianie instalacji solarnych oraz wyposażenia.

Nośność i niezawodność konstrukcji sprawdzono na modelu obliczeniowym zaproponowanego najmniejszego energoaktywnego segmentu hali, pokazanego na rysunku 1b. Rozdzielenie energoaktywnych segmentów konstrukcji na globalnie kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia (KDMZ): przechyłowe słupów i belkowe przekrycia (rys. 1c), ułatwia zastosowanie probabilistycznej optymalizacji nośności i niezawodności energoaktywnych segmentów hali oraz bezinwestycyjne zwiększenie nośności i niezawodności konstrukcji. W konkretnym rozwiązaniu (rys. 1b) zaproponowano minimalne segmenty energoaktywne szerokości 6 oczek, a złożone z 3 geometrycznie niezmiennych segmentów montażowych. Takie energoaktywne segmenty zawierają KDMZ, sprzęgające powyżej  $n > 4$  elementów sprawczych, umożliwiające zachowanie nośności i niezawodności powyżej wartości zalecanych w normie [6].

## 2. Wpływ temperatury na KDMZ energoaktywnych konstrukcji

Analizę KDMZ (rys. 1c) segmentów konstrukcji pokazano na przykładzie jednonawowej hali o rozpiętości  $L = 36$  m. Geometrię oraz przekroje elementów zaprojektowano według systemu Zachód [2]. Założono sztywne zamocowanie słupów w fundamentach oraz przegubowe podparcie przekrycia struktury w węzłach dolnych.

## 3. Kompensacja obciążeń

Na rysunku 2 pokazano ekstremalne kombinacje obciążeń i przemieszczeń energoaktywnego segmentu hali: a) wariant 1 (rys. 2a) pokazuje przemieszczenia pod obciążeniem: stałym, śniegiem, wiatrem (obciążenia słupów: parcie przyjęte = 2,55 kN/m, ssanie = -1,15 kN/m) oraz ujemną temperaturą w pasie dolnym wiązara, b) wariant 2 (rys. 2b) pokazuje przemieszczenia pod obciążeniem: stałym, wiatrem i dodatnią awaryjną temperaturą +100°C w pasie dolnym. W pracy założono automatyczne chłodzenie wg nastawionej maksymalnej temperatury dopuszczalnej ze względu na użytkowanie obiektu. Wysoka temperatura wewnątrz hali zmniejsza lub eliminuje obciążenie śniegiem segmentów energoaktywnych hal. Na rysunku 2 linią przerywaną pokazano przemieszczenia (mm) konstrukcji w wyniku działania poszczególnych kombinacji obciążeń.

Zastosowanie przegubowego podparcia przekrycia skutkuje zmniejszeniem ekstremalnych sił w elementach konstrukcji. W wariancie 2 (rys. 2b) słup jest o 4% mniej wyjęzony, a siła normalna w słupie jest rzędu 30% mniejsza w stosunku do wariantu obciążenia 1 (rys. 2a). Dla wariantu 2 obciążenie pasa dolnego uległo redukcji o ponad 40% w stosunku do wariantu 1. W wyniku działania wiatru oraz wysokiej dodatniej temperatury zwiększają się przemieszczenia struktury, ale nie siły w elementach KDMZ. Biorąc pod uwagę zastosowanie probabilistycznej optymalizacji konstrukcji

za pomocą sprzężenia elementów sprawczych w niezależnych globalnych KDMZ, segmenty dylatacji można wymiarować wg norm szczegółowych bez konieczności zwiększenia nośności elementów.

#### 4. Zastosowanie podkładek elastomerowych

W przypadku zainstalowania wysokotemperaturowych absorberów EC można zmniejszyć wpływ temperatury na wyężenie konstrukcji przez zastosowanie przekładek kompensacyjnych w głowicach słupów. Elastomerowe przekładki przyczyniają się do wyrównania przemieszczeń oraz odchyłek wymiarowych głowic słupów i zmniejszają maksymalne wyężenie słupów [3].

W tabeli 1 pokazano przemieszczenia poziome głowic słupów przed ( $u_{j,i}$ ) i po ( $U_{j,i}$ ) zastosowaniu podkładek elastomerowych. Największe wyężenie słupów zachodzi przy 2 kombinacji obciążenia stałego, śniegu, wiatru i ujemnej temperatury, a nie przy dodatniej (awaryjnej) temperaturze. W pozostałych przypadkach obciążeniowych różnice między deformacją słupa lewego i prawego są niewielkie (rzędu 2% dla  $i = 1$ ,  $i = 2$  oraz max 11% w sytuacji  $i = 4$ ).

#### 5. Oszacowanie niezawodności KDMZ energoaktywnych segmentów hali

W przypadku wiązarowo-płatwiowych przekryć segmentów dylatacyjnych należy stosować ciągłe stężenia pościowe wzdłuż słupów oraz ciągłe stężenia poprzeczne między wiązarami. W praktyce prowadzi to do konstruowania przekryć rusztowych, między innymi z uwagi na podparcie wyposażenia w warstwie dolnej przestrzeni konstrukcyjnej segmentów energoaktywnych.

W przypadku przekrycia strukturą trend zmniejszający obliczeniową nośność elementów przekrycia i słupów odwraca się na trend zwiększający nośność i niezawodność KDMZ segmentu, np. kwantyl  $N_k$  nośności najsłabszego KDMZ  $m$  rozciąganych pasów dolnych konstrukcji segmentu możemy oszacować ze wzoru (1) wg [4].

Jak wynika z pracy [4, 5] kwantyl nośności (odpowiednik nośności obliczeniowej)  $m > 4$  sprzężonych równolegle elementów jest większy od zmniejszenia kwantyli nośności statycznie wyznaczalnych wiązarów złożonych z 69 elementów sprawczych (23 pręty i 46 połączeń).

#### 6. Podsumowanie

W wybranej koncepcji statycznej występują dwie globalne i w zasadzie niezależne grupy KDMZ sprzę-

gające minimum 6 elementów sprawczych. Koncepcja spełnia wymagania niezawodności konstrukcji, zawarte w [6], zaprojektowanej wg [7], bez potrzeby zwiększania nośności elementów. Rozdzielenie generalnych KDMZ przekryć i KDMZ słupów pozwoliło na lepsze oszacowanie zwiększonej nośności i niezawodności wydzielonych energoaktywnych segmentów konstrukcji zaprojektowanych wg norm szczegółowych [6, 7].

Koncepcja energoaktywnych segmentów hali umożliwia bezpieczne przystosowanie konstrukcji segmentów hal do energoaktywnego pozyskiwania EC oraz EE z promieniowania słonecznego.

Przekrycie segmentu hali strukturą regularną lub z co drugim oczkiem pustym ma wystarczającą sztywność poziomą przekrycia do sprzężenia słupów w jeden przechyłowy mechanizm zniszczenia. Podział energoaktywnych segmentów dylatacyjnych na geometrycznie niezmiennie segmenty montażowe umożliwia swobodny i szybki montaż konstrukcji energoaktywnych segmentów hali.