

Destrukcyjny wpływ temperatury na eksploatację przekryć stalowych dużych rozpiętości



mgr inż.
OLEKSANDR LITVYN
Kyiv National University of Construction and Architecture,
Construction department
ORCID: 0000-0002-2818-3457



VOLODYMYR SAKHAROV JR.
Uniwersytet Zielonogórski,
Wydział Informatyki,
Elektrotechniki i Automatyki
ORCID: 0000-0001-5237-1573



prof. dr hab. inż.
JAKUB MARCINOWSKI
Uniwersytet Zielonogórski,
Wydział Budownictwa, Architektury
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0000-0001-6834-0843



dr hab. inż.
VOLODYMYR SAKHAROV
Uniwersytet Zielonogórski,
Wydział Budownictwa, Architektury
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0000-0002-9381-3283

Przedmiotem rozważań zaprezentowanych w artykule są przemieszczenia i naprężenia w elementach stalowych dźwigarów kratowych, spowodowane zmianami temperatury zewnętrznej oraz nierównomiernym rozkładem temperatur wewnątrz hali.

Przekrycia hal widowiskowych, hal przemysłowych i innych obiektów wielkopowierzchniowych zazwyczaj są wykonywane ze stalowych dźwigarów kratowych. Dolne pasy dźwigarów znajdują się w przestrzeni użytkowej hali, a górne przylegają do pokrycia dachu. W przypadku hal ogrzewanych pokrycie składa się z warstw izolacyjnych przylegających do pasa górnego. W efekcie takich rozwiązań górny pas stalowego dźwigara kratowego znajduje się w innych warunkach cieplnych niż pozostałe elementy dźwigara, których temperatura jest w przybliżeniu równa temperaturze powietrza w wyższych fragmentach hali.

Przedmiotem referatu są szczegółowe analizy wpływu zróżnicowanych temperatur pasów dźwigara kratowego na stan jego wyężenia i deformacji w warunkach maksymal-

nych gradientów temperatur możliwych do wystąpienia podczas normalnej eksploatacji hali.

Inspiracją do przeprowadzonych badań były pomiary przemieszczeń wykonywane w hali widowiskowej, w której konstrukcją nośną dachu były kratowe dźwigary stalowe. Mierzono ugięcia od obciążeń skupionych przykładowych w węzłach pasa dolnego kratownic oraz, niezależnie, przemieszczenia wybranych węzłów wywołane zmianami temperatury. W trakcie pomiarów prowadzono rejestrację temperatur na różnych poziomach hali. Szczegółowa analiza uzyskanych wyników i ich porównanie z symulacjami numerycznymi doprowadziły do ważnych spostrzeżeń: wartości przemieszczeń wywołanych obciążeniami były znacząco mniejsze od wartości przemieszczeń spowodowanych różnicą temperatur pasów dźwigarów kratowych. To spostrzeżenie wpłynęło

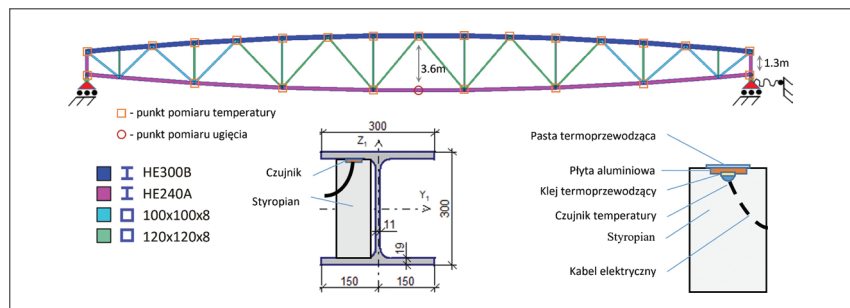
na decyzję, by szczegółowo pomierzyć temperatury w różnych fragmentach dwóch dźwigarów kratowych oraz przemieszczenia punktów pasa dolnego wywołane wyłącznie wpływem zmian temperatury.

W pracy przedstawiono wyniki tych pomiarów, obliczenia za pomocą wzorów analitycznych, wyniki symulacji numerycznych oraz wnioski z przeprowadzonych analiz.

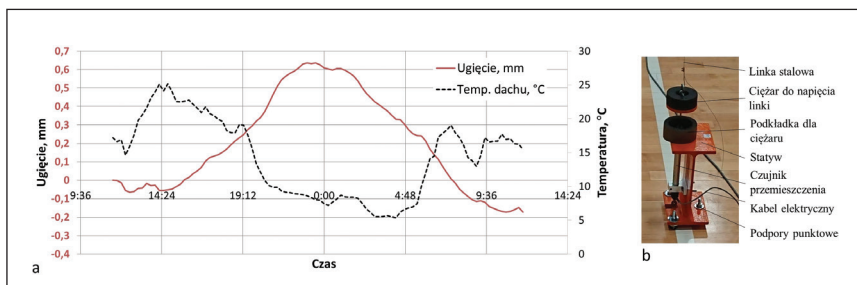
Pomiary temperatur i przemieszczeń

Na rys. 1. pokazano schematycznie dźwigar kratowy stanowiący główny element konstrukcyjny przekrycia hali o rozpiętości 50 m. W długotrwałych pomiarach rozkładu temperatury w obu pasach dwóch kratownic wykorzystano 50 czujników wysokiej dokładności. Sposób ich rozmieszczenia i montażu pokazano na rys. 1. Poza temperaturą powierzchni stali półki górnej pasa górnego kratownicy mierzono także temperaturę powietrza na różnych wysokościach hali oraz temperaturę na zewnątrz hali tuż nad połacią dachu. Akwizycja danych odbywała się automatycznie za pomocą kaset pomiarowych przekazujących wyniki łączem internetowym.

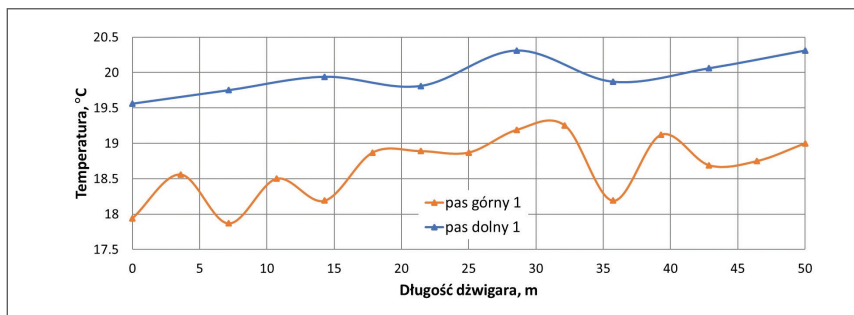
Poza stałą rejestracją temperatury okresowo wykonywano pomiary przemieszczeń w punkcie pokazanym na rys. 1. Czujnik przemieszczeń ustawiono w poziomie posadzki (por. rys. 2b) i połączono cienką linką stalową



Rys. 1. Schemat głównego dźwigara kratowego oraz szczegół montażu czujników temperatury



Rys. 2. Ugięcia dźwigara pod wpływem zmiany temperatury: a – przemieszczenia pionowe w środku, b – przetwornik przemieszczeń

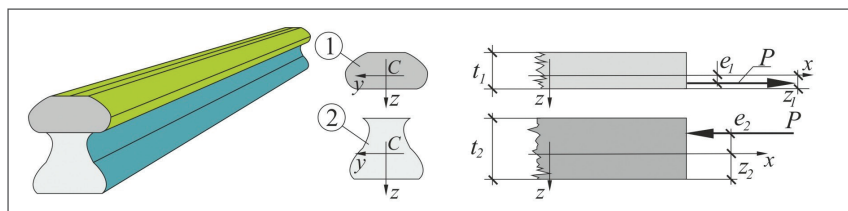


Rys. 3. Rozkład temperatury na długości pasa górnego i dolnego dźwigara

z punktem pomiarowym zlokalizowanym na dolnym pasie dźwigara kratowego.

Zmiany temperatur następowaly cyklicznie zgodnie z dobowymi zmianami temperatury zewnętrznej. Cykliczny charakter miały także przemieszczenia kratownicy (por. rys. 2a) i deformacje jej elementów wywołane różnicą temperatur pasów. Badania wykazały, że ze względu na nierównomierne nasłonecznienie powierzchni dachu oraz zróżnicowania grubości warstw izolacyjnych rozkład temperatury na długości pasa górnego był zmienny. Potwierdza to rozkład temperatur pokazany na rys. 3. Takie temperatury zostały zarejestrowane 11.11.2019 r. o godz. 8.20, gdy temperatura na zewnątrz wynosiła -0,2°C.

Pomiary wykonywane zarówno w okresie niskich temperatur, jak i w trakcie upałów letnich potwierdziły istotne zróżnicowanie temperatur pasów kratownic. Maksymalne różnice stwierdzone podczas pomiarów sięgały 8°C. Taką różnicą temperatur pasów może wywołać przemieszczenie pionowe centralnych węzłów kratownicy o 10 mm. Dokładniejsza analiza oraz symulacje numeryczne pozwoliły ustalić, że pomierzone temperatury dotyczą nie całego pasa górnego, a jedynie półki górnej tego pasa. Półka dolna oraz duża część środnika pasa górnego wykazują temperaturę zbliżoną do temperatury powietrza w górnej części hali.



Rys. 4. Myślowo rozdzielony pręt zespolony (por. [1])

Naprężenia i deformacje belki nierównomiernie ogrzanej. Rozwiązanie analityczne

Wzory analityczne wyprowadzone w [1], a odnoszące się do belek złożonych z różnych materiałów (por. rys. 4.) poddanych działaniu temperatury mogą być wykorzystane także w rozważanym przypadku: częścią 1 jest półka górna, a częścią 2 jest pozostała część przekroju dwuteowego. Skoro obie części belki są wykonane z tego samego materiału, a tylko część 1 (półka) została podgrzana o ΔT , to podstawiając $E_1 = E_2 = E$, otrzymamy następujący wzór na siłę P wzajemnego oddziaływania obu części (por. [1]):

$$P = E \Delta T \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) A_1 A_2 (J_1 + J_2)}{(J_1 + J_2)(A_1 + A_2) + C_1^2 A_1 A_2} \quad (1)$$

gdzie:

$$C_1 = t_2 + z_1 - z_2, \quad (2)$$

$$e_1 = C_1 \frac{J_1}{J_1 + J_2}, \quad e_2 = C_1 \frac{J_2}{J_1 + J_2}. \quad (3)$$

We wzorach tych A_i , J_i i α_i oznaczają odpowiednio pole przekroju, moment bezwładności względem osi własnej y oraz współczynnik rozszerzalności termicznej części i . E oznacza moduł Younga.

Wzór (1) wyprowadzono przy założeniu, że obie części belki zostały podgrzane o ΔT . Aby go zastosować w rozważanym przypadku, należy podstawić $\alpha_2 = 0$, co zagwarantuje nieodkształcalność termiczną części 2 belki. Tak było w rozważanym przypadku. Deformacje części 2 oczywiście wystąpią, ale są one spowodowane odkształceniami termicznymi części 1.

Warto zauważyć, że obie siły P działają wzdłuż wspólnej linii, gdyż tylko wtedy w przekroju zespolonym nie powstanie ani moment, ani siła osiowa (por. [1]).

Znajomość siły P pozwala określić naprężenia we włóknach górnych (G) i dolnych (D) obu części belki ze wzorów podanych w [1].

Rozważmy jeszcze stan przemieszczeń belki pokazanej na rys. 5. poddanej zmianie temperatury o T . Krzywiznę pręta określimy ze wzoru:

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{P e_1}{E_1 J_1} = \frac{P e_2}{E_2 J_2} = \Delta T C_1 \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) A_1 A_2}{(J_1 + J_2)(A_1 + A_2) + C_1^2 A_1 A_2} \quad (4)$$

Szczególna postać tego wzoru dla przypadku pręta złożonego z dwóch płaskowników o tej samej szerokości jest podana w pracy [2].

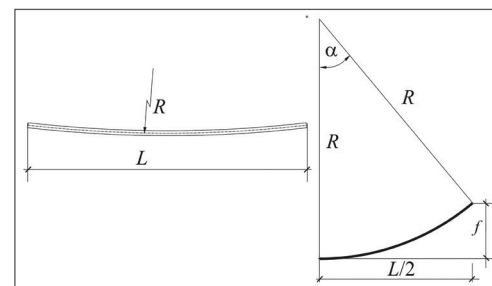
Obliczona krzywizna jest stała na całej długości L pręta. Po względnie prostych przekształceniach otrzymamy strzałkę wygięcia belki w postaci (por. [1]):

$$f = R \left(1 - \sqrt{1 - \frac{L^2}{4R^2}} \right) \quad (5)$$

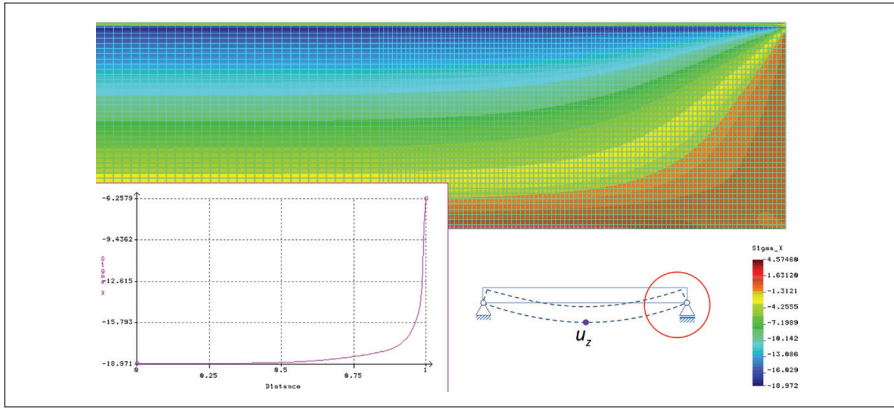
Obliczenia odkształceń i naprężeń w pasie górnym kratownicy

Przedmiotem szczegółowej analizy jest swobodnie podparty, 3,5 m odcinek pasa między węzłami pasa górnego dźwigara kratowego. W przypadku pręta walcowanego HEB300, którego górna półka została schłodzona o 8°C (maksymalna różnica zarejestrowana w listopadzie), do podanych wyżej wzorów należy podstawić: $E=210$ GPa, $t_1=19$ mm, $z_1=9,5$ mm, $A_1=5700$ mm², $J_1=171475$ mm⁴, $t_2=281$ mm, $z_2=56,683$ mm, $A_2=8582$ mm², $J_2=5,44437 \cdot 10^4$ mm⁴, $\alpha_1=12 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹, $\alpha_2=0$ °C⁻¹, $\Delta T=8$ °C.

Poza obliczeniami wykonanymi za pomocą przedstawionych wzorów wykonano także



Rys. 5. Wygięcie pręta pod wpływem zmiany temperatury (por. [1])



Rys. 6. Rozkład naprężeń σ_x w środku w przęciu w pobliżu podpory

symulacje numeryczne. W analizie numerycznej zapewniono warunki brzegowe gwarantujące swobodę deformacji, rozpatrując jedynie połowę belki. Analizę przeprowadzono w systemie COSMOS/M [3], wykorzystując przy tym elementy skończone rodziny SHELL4 (powłokowe).

Na rys. 6. i 7b przedstawiono rozkłady naprężeń σ_x otrzymane w wyniku analizy numerycznej dla przypadku $\nu = 0,3$. Na rys. 7a przedstawiono rozkład naprężeń otrzymany ze wzorów analitycznych.

Otrzymany w symulacjach numerycznych rozkład naprężeń niewiele odbiega od rozkładu otrzymanego ze wzorów analitycznych (por. rys. 7.). Wartość maksymalnych naprężeń wzdłużnych w środku jest znacząca i wynosi: 18,97 MPa – rozwiązanie numeryczne, 16,97 MPa – rozwiązanie analityczne. Warto wspomnieć, że

gdyby w modelu numerycznym przyjęć $\nu = 0$, co oznacza lepszą zgodność z teoretycznym modelem belkowym, naprężenia w środku byłyby równe 16,81 MPa, co jest wartością bardzo bliską wartości otrzymanej ze wzorów analitycznych.

W obszarze gwałtownej zmiany naprężeń normalnych, w pobliżu końców belek, występują także naprężenia styczne τ_{xz} . Osiągają one wartość maksymalną 10,04 MPa i występują lokalnie w końcowych fragmentach belki.

Schłodzenie półki o $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ skutkuje obniżeniem pręta o 0,481 mm (wynik symulacji numerycznych). Ze wzoru analitycznego (5) otrzymujemy wartość $u_z = 0,487$ mm, co oznacza bardzo dobrą zgodność otrzymanych wyników przemieszczeń.

Podsumowanie i wnioski

Stalowe dźwigary kratowe deformują się na skutek różnych temperatur pasa górnego i pasa dolnego. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na deformację pasa górnego jest różnica temperatur między półką górną tego pasa a pozostałą częścią przekroju.

W przypadku analizowanego dźwigara kratowego, o pasie z dwuteownika HEB300, stwierdzono, że przy maksymalnej różnicy temperatur między półką górną i pozostałą częścią przekroju rzędu 8°C mogą wystąpić naprężenia wzdłużne w środku na poziomie 18 MPa. Naprężeniom tym towarzyszą ugięcia globalne całego dźwigara kratowego rzędu 5 mm oraz lokalne zakrzywienie odcinków pasa górnego między węzłami o strzałce 0,5 mm.

Opisane przypadki deformacji spowodowanych różnicą temperatur mogą powodować złuszczenie farby ogniochronnej oraz wpływać na stan techniczny innych elementów wykończenia hali, jak sufity podwieszane, okładziny ozdobne sufitów czy tynki sufitów pokryte polichromiami.

Przedstawione w pracy rozważania potwierdzają konieczność uwzględnienia nierównomiernych rozkładów temperatur w analizach dotyczących stanu technicznego zarówno samych dźwigarów kratowych, jak i innych elementów hali połączonych z tymi dźwigarami.

Literatura:

- [1] Marciniowski J. 2018, Naprężenia w warstwowej konstrukcji zespolonej z materiałów o różnej rozszerzalności termicznej, „Materiały Budowlane” 2018, nr 4, s. 107-109, ISSN: 0137-2971, DOI: 10.15199/33.2018.04.37.
- [2] Clyne T.W., 1996, Residual stresses in surface coatings and their effects on interfacial debonding, “Key Engineering Materials”, vol. 116/117, 307, 330.
- [3] COSMOS/M, Finite Element Analysis System, Version 2.5, Structural Research and Analysis Corporation, Los Angeles, California, 1999.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.8797

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

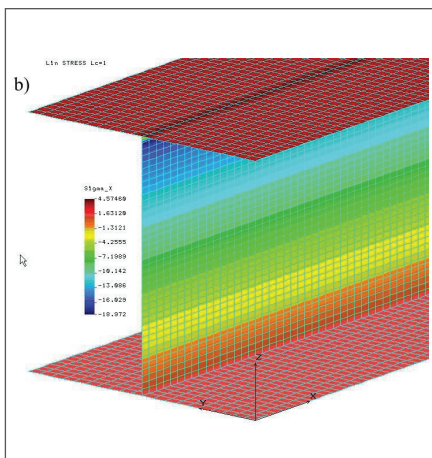
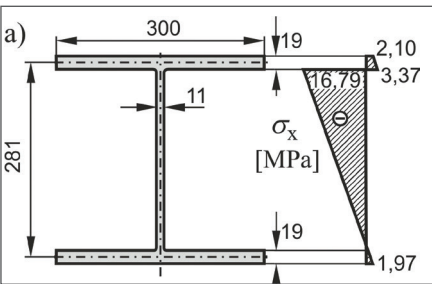
Lytvyn Oleksandr, Sakharov jr. Volodymyr, Marciniowski Jakub, Sakharov Volodymyr, 2020, Destrukcyjny wpływ temperatury na eksploatację przekryć stalowych dużych rozpiętości. „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.8797

Streszczenie: Przedmiotem rozważań zaprezentowanych w pracy są przemieszczenia i naprężenia w elementach stalowych dźwigarów kratowych, spowodowane zmianami temperatury zewnętrznej i nierównomiernym rozkładem temperatur wewnątrz hali. Wielodniowe pomiary przemieszczeń stalowych, kratowych dźwigarów dachowych dużej rozpiętości połączone z pomiarami temperatury w przestrzeni hali i w różnych punktach dźwigarów wykazały znaczący wpływ nierównomiernego rozkładu temperatur na przemieszczenia. Zmierzone wartości przemieszczeń zostały porównane z przemieszczeniami otrzymanymi drogą symulacji numerycznych, w których danymi wejściowymi były pomierzone temperatury. Poza przemieszczeniami w pracy przeanalizowano także wzrost naprężeń w wybranych elementach dźwigara kratowego, spowodowany nierównomiernym rozkładem temperatur. Oceniono destrukcyjny wpływ temperatury na stan wytrzymałości analizowanych stalowych dźwigarów kratowych.

Słowa kluczowe: stalowe dźwigary kratowe, pomiary temperatury, przemieszczenia, naprężenia

Abstract: The destructive effect of temperature on the operation of steel covers of large spans. The subject of considerations presented in the work are displacements and stresses in steel elements of truss girders, caused by changes in the external temperature and uneven distribution of temperatures inside the hall. Multi-day measurements of displacement of steel, large-span truss roof girders combined with temperature measurements in the hall space and at various points of the girders showed a significant influence of uneven temperature distribution on the displacements. The measured displacement values were compared with the displacements obtained by numerical simulations, in which the input data were measured temperatures. In addition to displacements, the increase of stress in selected elements of the truss girder, caused by uneven temperature distribution, was also analyzed in the paper. The destructive effect of temperature on the strain and stress state of the analyzed steel truss girders was assessed.

Keywords: steel truss girders, temperature measurements, displacements, stresses



Rys. 7. Rozkład naprężeń σ_x w środku rozpiętości belki na podstawie rozwiązania analitycznego a) oraz w wyniku symulacji numerycznych b)