

# Stateczność przestrzenna stężonych poprzecznie słupów hal ze skokową zmianą przekroju



dr inż.  
**MICHAŁ REDECKI**  
Politechnika Wroclawska,  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
ORCID: 0000-0003-1469-0164



prof. dr hab. inż.  
**BRONISŁAW GOSOWSKI**  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,  
Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska  
i Geodezji  
ORCID: 0000-0003-3217-2280

W artykule dokonano oceny przydatności wybranych programów komputerowych do obliczeń nośności krytycznej stateczności przestrzennej dwustopniowych słupów hal przemysłowych. Analizowano przy tym następujące programy komputerowe bazujące na metodzie elementów skończonych: LTBeamN, SOFiSTiK, Abaqus FEA.

W artykule zajęto się statecznością stalowych, pełnościennych słupów hal przemysłowych z jednokrotną skokową zmianą przekroju. Słupy takie są zazwyczaj stosowane w halach wyposażonych w natorowe suwnice pomostowe. Na poziomie skokowej zmiany przekroju słupów – na odpowiednich wspornikach – opiera się belki podsuwnicowe. Słupy hal ze skokową zmianą przekroju, w zależności od ich zlokalizowania w szkieletie konstrukcji, mogą mieć zmianę przekroju zrealizowaną osiowo (słupy rzędów środkowych w halach wielonawowych) lub nieosiowo (słupy rzędów skrajnych) [1-3]. W przypadku poprawnego rozwiązania systemu konstrukcyjnego hal z ryglowymi ścianami podłużnymi, dzięki odpowiednim stężeniom, rygle ściennie stanowią dodatkowe stężenia poprzeczne słupów w płaszczyźnie ich mniejszej sztywności giętej. W konsekwencji utrata stateczności słupów z płaszczyzny układu poprzecznego hali następuje nie w postaci giętej, lecz giętno-skrętnej, czemu towarzyszy zwiększenie odpowiedniego obciążenia krytycznego. Wyznaczenie tego obciążenia bywa kłopotliwe zarówno ze względu na konieczność uwzględnienia stężeń, jak i realizację skokowej zmiany przekroju [4-5]. W przypadku korzystania z programów komputerowych wymaga to odpowiedniej modyfikacji modeli numerycznych.

W pracy dokonano oceny przydatności wybranych programów komputerowych do obliczeń nośności krytycznej stateczności przestrzennej dwustopniowych słupów hal przemysłowych. Rozważano przy tym następujące programy komputerowe bazujące na metodzie elementów skończonych:

LTBeamN, SOFiSTiK, Abaqus FEA. W przypadku słupów z osiową zmianą przekroju, obciążonych osiowo, wyniki obliczeń komputerowych porównano z rozwiązaniem analitycznym, które zostały wyprowadzone w pracach [4, 6], a w przypadku słupów z nieosiową zmianą sztywności – z wynikami zamieszczonymi w pracy [7].

## Analizy numeryczne

Głównym celem przeprowadzonych analiz jest dobór odpowiednich modeli numerycznych. Należy przez to rozumieć dobranie rodzaju elementu skończonego, jego typu, a także warunków brzegowych w taki sposób, aby jak najdokładniej odwzorować rzeczywiste zachowanie modeli referencyjnych [4, 6, 7].

Przy wyznaczaniu wartości obciążeń krytycznych stateczności sprężystej wykorzystano następujące oprogramowanie: LTBeamN [8], SOFiSTiK [9] oraz Abaqus FEA [10]. Pierwszy jest darmowym kalkulatorem wyznaczającym obciążenia krytyczne ściskanych i zginanych, stężonych poprzecznie elementów konstrukcyjnych. Drugi jest

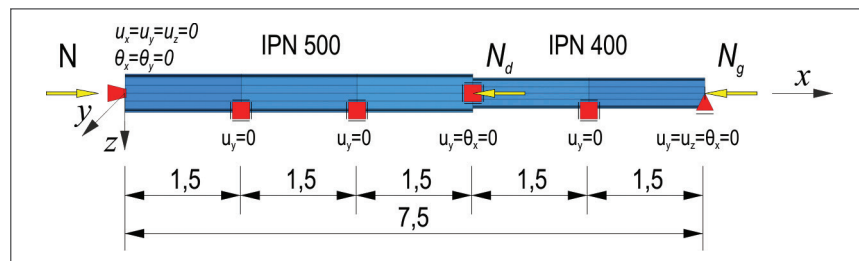
pakietem szeroko stosowanym w budownictwie lądowym do modelowania, analizy i projektowania obiektów inżynierskich, zaś trzeci jest narzędziem służącym do rozwiązywania skomplikowanych problemów naukowych i inżynierskich.

## Słup wewnętrzny hali

Pierwszym przyjętym modelem jest słup będący przedmiotem rozważań w pracach [4, 6]. Na rysunku 1. pokazano numeryczny model belkowy z programu SOFiSTiK, wraz z przyjętymi warunkami podparcia. Przeanalizowano trzy przypadki obciążenia i przyjęto, że szukane obciążenie krytyczne ( $N_{cr}$ ) jest reakcją, która zależy także od parametru  $\alpha$  wyrażonego w następujący sposób:

$$\alpha = \frac{N_g}{N_g + N_d} = \frac{N_g}{N}. \quad (1)$$

Tabela 1. zawiera porównanie wartości obciążeń krytycznych analizowanego słupa (por. rys. 1), które wyznaczono analitycznie oraz z wykorzystaniem programów. Zamieszczono obciążenia krytyczne wybożenia giętnego  $N_{cr,y}$  oraz giętno-skrętne  $N_{cr,TF}$ . Zna-



Rys. 1. Widok belkowego modelu numerycznego słupa o osiowej, skokowej zmianie przekroju poprzecznego, analizowanego w [4, 6]



Tabela 2. Porównanie wartości obciążeń krytycznych [kN] analizowanych słupów dwustopniowych

Obciążenie		SOFISTIK		LTBeamN	Abaqus FEA		badania modelowe [7]
		prętowy	powłokowy		idealny	dokładny	
głowicy	$N_{cr,TF}$ [kN]	265,5	225,2	356,8	258,7	332,3	371
	$\delta_{cr}$ [%]	-28,4	-39,3	-3,8	-30,3	-10,4	0
wspornika	$N_{cr,TF}$ [kN]	198,3	264,3	496,4	208,2	287,4	326
	$\delta_{cr}$ [%]	-38,4	-17,9	54,2	-35,3	-11,8	0

$\delta_{cr}$  — procentowy błąd względny

mm, dowiązано do modelu więzami kinematycznymi. Są to nieskończenie sztywne więzi, które pozwalają na zdefiniowanie relacji polegającej na zgodności przemieszczeń pomiędzy łączonymi elementami.

Ostatnią serię analiz numerycznych przeprowadzono z wykorzystaniem programu Abaqus FEA na modelach ze skończonych elementów brytowych. Przyjęto dwa, różniące się sposobem podparcia, typy słupów: idealny oraz dokładny. W pierwszym z nich przyjęto idealny sposób podparcia w podstawie i głowicy. Podparcie drugiego zamodelowano w taki sposób, aby jak najwierniej odwzorować rzeczywiste warunki panujące podczas badań doświadczalnych [7]. W pracach [7, 12] omówiono ich konstrukcję oraz sposób, w jaki zdefiniowano i przyłożono obciążenie. Zasadniczo kształty postaci utraty stateczności obu typów są do siebie zbliżone, jednak jeżeli chodzi o wartości, to wyniki otrzymane z analiz modelu dokładnego są dużo bliższe wynikom badań doświadczalnych.

Wyniki, które otrzymano, bazując na omówionych modelach numerycznych, okazały się bardzo różnicowane. Zestawiono je w tabeli 2. dla modeli obciążonych w głowicy ( $\alpha = 1,0$ ) i na wsporniku ( $\alpha = 0,0$ ). Względna różnica pomiędzy nimi wynosi, w przypadku obciążenia przyłożonego do głowicy, prawie 40% oraz 55%, gdy obciążenie przyłożono do wspornika. Podobne analizy w odniesieniu do statycznej pracy przeszła mostowego z jeszcze większymi rozbieżnościami sięgającymi 117% przeprowadzili autorzy pracy [13].

Z ogólnej oceny wartości zamieszczonych w tabeli 2. wynika, że modele obciążone w głowicy wykazują lepszą zbieżność niż modele obciążone na wsporniku. Średnie różnice rzędu 30% są zgodne z analizami przeprowadzonymi na idealnych modelach referencyjnych [7]. Najlepszą zgodnością wyników z doświadczeniem cechują się dokładne modele zbudowane z elementów brytowych w programie Abaqus FEA, ponieważ względna różnica jest na poziomie -10%. Pozostałe wyniki są zbliżone i oscylują w granicach -30%.

Rezultatów otrzymanych z programu LTBeamN nie można niestety uznać za satysfakcjonujące. Jest to spowodowane tym, że w przypadku obciążenia wspornika obciążenie krytyczne jest zawyżone, i to o 55%, co nie jest z korzyścią dla bezpieczeństwa.

## Podsumowanie i wnioski

Ocena nośności krytycznej stateczności przestrzennej słupów hal przemysłowych o skokowej zmianie przekroju poprzecznego stężonych punktowo na długości jest zagadnieniem złożonym. Sposób modelowania oraz zastosowane oprogramowanie mają wpływ na otrzymane rezultaty [7, 13]. Dokonane porównania wskazują na rozbieżności przy wyznaczaniu obciążeń krytycznych tego typu obiektów. Za najbardziej wiarygodne rezultaty przyjęto wyniki otrzymane z wykorzystaniem programu Abaqus FEA. Jednakże z uwagi na specyfikę programu trudno sobie wyobrazić jego praktyczne, inżynierskie zastosowanie. Dlatego kolejnymi modelami, które zdaniem autorów mogą być zastosowane w praktyce inżynierskiej, są: powłokowy i belkowy z 7 stopniami swobody w węźle zdefiniowane w programie SOFISTIK. Niestety darmowe oprogramowanie LTBeamN nie do końca spełniło stawiane oczekiwania. Ograniczenia programu co do wprowadzania obciążeń miłośrodkowych czy związane z kształtowaniem skokowej zmiany sztywności nie pozwoliły na uzyskanie zadowalających rezultatów.

## Bibliografia

- [1] Kucharczuk W., Labocha S., Hale o konstrukcji stalowej. Poradnik projektanta, Polskie Wydawnictwo Techniczne, 2012.
- [2] Biegus A., Stalowe budynki halowe, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2003.
- [3] AISC. Guide for the Design and Construction of Mill Buildings, Association of Iron and Steel Engineers, 2003.
- [4] Gosowski B., Zur Stabilitätsanalyse der axial belasteten Stahlbaustützen mit I-Querschnitt, „Bauingenieur“, vol. 63, 1988, s. 229–237.
- [5] Gosowski B., Drillknicken einfach-symmetrischer Stahlstützen mit erzwungener Drehachse, „Stahlbau“, vol. 77, 2008, s. 669–680.
- [6] Gosowski B., Wyboczenie osiowo obciążonych prętów cienkościennych z punktowymi więzami sprężystymi, „Archiwum Inżynierii Lądowej“, Vol. XXVII, Nr 4, 1981, s. 635–652.
- [7] Redecki M., Nośność stężonych poprzecznie, dwuteowych słupów stalowych ze skokową niesymetryczną zmianą przekroju, „Politechnika Wroclawska“ 4/2017 (praca doktorska).
- [8] <https://www.cticm.com/centre-de-ressources/> (dostęp: 05.12.2019 r.).
- [9] SOFISTIK Manual, Version 2018-12, SOFISTIK AG, Oberschleissheim, Germany 2018.
- [10] Abaqus FEA 6.14, Abaqus FEA Documentation, Providence, RI, USA: Dassault Systèmes 2014.
- [11] Maljaars J., Stark J.W.B., Steenbergen H.M.G.M., Buckling of coped steel beams and steel beams with partial endplates, „Heron“, vol. 49, no. 3, 2004, s. 233–271.
- [12] Redecki M., Gosowski B., The influence of the torsional restraint of crane column brackets on their critical load capacity, „MATEC Web of Conferences“, vol. 262, 2019.
- [13] Oleszek R., Radomski W., Wpływ dyskretyzacji na obliczenia skośnego wiaaduktu o przekroju pół-plytowym, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej“, vol. 18, 2014, s. 107–120.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.8787

## PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Redecki Michał, Gosowski Bronisław, 2020, Stateczność przestrzenna stężonych poprzecznie słupów hal ze skokową zmianą przekroju. „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.8787

**Streszczenie:** Dokonano oceny przydatności wybranych programów komputerowych do obliczeń nośności krytycznej stateczności przestrzennej dwustopniowych słupów hal przemysłowych. Analizowano przy tym następujące programy komputerowe bazujące na metodzie elementów skończonych: LTBeamN, SOFISTIK, Abaqus FEA. Wyniki obliczeń komputerowych, zarówno w przypadku słupów z osiową, jak i nieosiową zmianą przekroju, porównano z rozwiązaniami dostępnymi w literaturze. Dokonane porównania wskazują na możliwość wykorzystania komercyjnych programów komputerowych, bazujących na metodzie elementów skończonych, do wyznaczania nośności krytycznej stateczności przestrzennej analizowanych słupów hal przemysłowych. Uzyskanie wyników obliczeń z dokładnością wystarczającą do celów projektowania wymaga jednak rozsądnego i umiejętnego stosowania dostępnego oprogramowania. W praktyce projektowej należy również rozważyć możliwości danego biura projektowego w kwestii dostępu do danego oprogramowania, a także czasu niezbędnego na zdefiniowanie odpowiednich modeli obliczeniowych.

**Słowa kluczowe:** konstrukcja stalowa, słup schodkowy, stateczność przestrzenna, MES

**Abstract:** spatial stability of laterally restrained stepwise non-prismatic steel hall columns. An assessment of the suitability of selected computer software's calculating the critical load-bearing capacity of the spatial stability of the industrial hall columns was conducted. The following computer programs based on the finite element method were analysed: LTBeamN, SOFISTIK, Abaqus FEA. The results of computer calculations, both in the case of columns with axial and non-axial change of the cross-section, were compared with the solutions available in the literature. The comparisons point out to the possibility of using commercial software based on the finite element method to determine the critical load-bearing capacity of spatial stability for these industrial hall columns. Obtaining calculation results with sufficient accuracy for design purposes requires, however, thoughtful and skilful use of the software available on the market. In practical design, one should also consider the possibilities of the given design office in terms of access to the software, as well as the time necessary to define the appropriate calculation models.

**Keywords:** steel structure, stepwise column, spatial buckling, FEM