

Damian GAŚKA, Manfred CHMURAWA

## GEOMETRYCZNE MODELOWANIE SUWNICY JAKO PODSTAWA WYMIAROWANIA JEJ USTROJU NOŚNEGO W ŚWIETLE NORM EUROPEJSKICH

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia obowiązujące aktualnie warunki wytrzymałości, trwałości i stateczności ustroju nośnego oraz problematykę modelowania rzeczywistego ustroju dla potrzeb sprawdzenia ww. warunków na przykładzie suwnicy bramowej.

### GEOMETRICAL MODELLING OF CRANE AS A BASIS TO DIMENSIONING OF ITS' LOAD-CARRYING STRUCTURES

**Summary.** The article shows current strength and stability conditions of load carrying structure and problematic of modelling the real structure on bridge crane as a example.

#### 1. WPROWADZENIE

W procesie projektowania nowej suwnicy ważnym stadium jest wymiarowanie jej ustroju nośnego. Wymiarowanie to polega na określeniu ostatecznej postaci i pełnych cech konstrukcyjnych, najczęściej stalowego ustroju nośnego, zdolnego do bezpiecznego przyjmowania odpowiednio skojarzonych obciążeń eksploatacyjnych [1-3], związanych z udźwigniem, środowiskiem pracy i warunkami użytkowania.

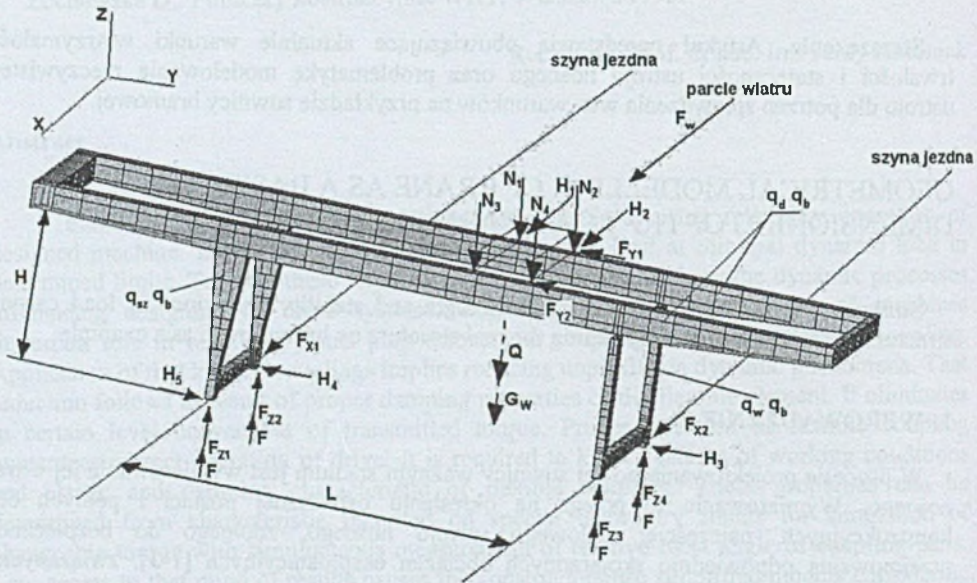
Wymiarowanie ustrojów nośnych, których masa własna dochodzi do 500 t i sięga 70% masy własnej całej suwnicy, mimo szeregu prac [4-6] i dostępu do rozwiniętych pakietów oprogramowań MES [6, 7], pozostaje nadal problemem otwartym. Najczęściej więc o konstrukcji i postaci ustroju suwnicy, a więc także o jej masie, kosztach i pracochłonności wykonania decyduje konstruktor, który wymiaruje ustrój na podstawie wspomaganych komputerowo obliczeń analitycznych i własnego doświadczenia. Jednocześnie obowiązują już nowe europejskie akty normatywne, które ze względów bezpieczeństwa powinny być stosowane w procesie wymiarowania dźwignic, a więc także suwnic.

Zaprezentowany w zarysie problem wymiarowania ustrojów nośnych, zwłaszcza w świetle norm europejskich, wymaga opracowania numerycznej lub numeryczno-doświadczalnej metody do relatywnie szybkiego prototypowania („rapid prototyping”) ustroju nośnego, który spełnia kryteria (warunki) wytrzymałości, trwałości i stateczności wymagane przez europejskie akty normatywne.

## 2. NOWE ZASADY WYMIAROWANIA STALOWYCH USTROJÓW NOŚNYCH SUWNIC

W obliczeniach ustrojów nośnych suwnic zgodnie z europejskimi aktami normatywnymi w zasadzie obowiązuje metoda stanów granicznych, można jednak także stosować metodę naprężeń dopuszczalnych [1, 9].

Poszczególne przekroje ustroju (dźwigara, podpór, czołownic, rys. 1-4) podlegają sprawdzeniu: wytrzymałości statycznej, wytrzymałości zmęczeniowej, wytrzymałości połączeń (spawanych, sworzniowych, tarciovych, śrubowych) oraz stateczności zespołów.



Rys. 1. Geometryczny model suwnicy bramowej z potencjalnym stanem obciążenia  
Fig. 1. Geometrical model of bridge crane with loads

$F_{zi}$ ,  $F$ ,  $N_i$  – naciski na koła jezdne i siły dynamiczne jazdy,  
 $H_i$  – siły boczne spowodowane zukosowaniem i parciem wiatru,  
 $q_d$ ,  $q_{sz}$ ,  $q_w$  – siły ciężkości ustroju nośnego,  
 $q_d$  – siły bezwładności,  
 $F_{xi}$ ,  $F_{yi}$  – siły styczne (hamowania),  
 $Q$ ,  $G_w$  – siły ciężkości ładunku i wózka,  
 $F_w$  – siła parcia wiatru.

### 2.1. Warunki wytrzymałości statycznej

Warunki wytrzymałości elementów odpowiedniego obliczanego przekroju mają postać:

$$\sigma_{Sd,x} \leq f_{Rd,x}; \quad \sigma_{Sd,y} \leq f_{Rd,y}; \quad \tau_{Sd} \leq f_{Rd} \quad (1)$$

Ustrój nośny suwnicy jest cienkościenną konstrukcją powłokową (rys. 1-4), zatem zaistnieje w nim płaski stan naprężenia, dla którego obowiązujący dodatkowy warunek wytrzymałości statycznej przyjmuje postać:

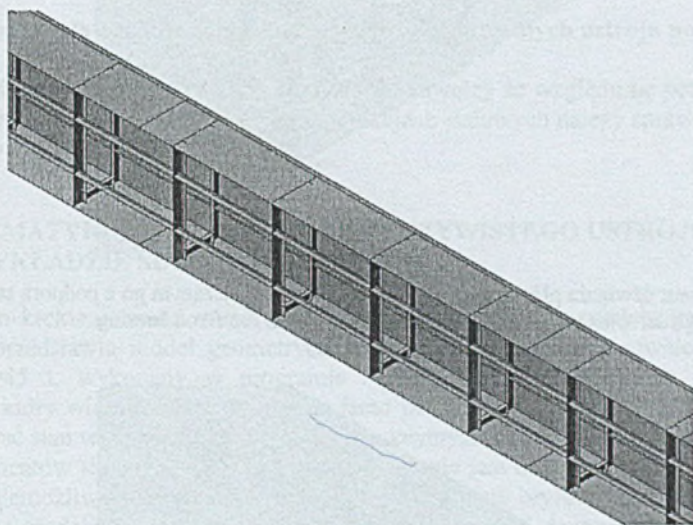
$$\left(\frac{\sigma_{Sd,x}}{f_{Rd,x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Sd,y}}{f_{Rd,y}}\right)^2 - \frac{\sigma_{Sd,x} \cdot \sigma_{Sd,y}}{f_{Rd,x} \cdot f_{Rd,y}} + \left(\frac{\tau_{Sd}}{f_{Rd}}\right)^2 \leq 1,0, \quad (2)$$

gdzie:

$\sigma_{Sd,x}$ ,  $\sigma_{Sd,y}$ ,  $\tau_{Sd}$  – obliczeniowe naprężenia normalne w kierunkach „x” i „y” oraz naprężenia styczne dla obciążeń obliczeniowych wg [3] odpowiednio skojarzonych z uwzględnieniem współczynników dynamicznych  $\phi_i$  i cząstkowych współczynników bezpieczeństwa  $\gamma_p$  wg tabl. 10 w [9];

$f_{Rd,y}$ ,  $f_{Rd,x}$ ,  $f_{Rd}$  – graniczne obliczeniowe naprężenia normalne w kierunkach „x” i „y” oraz styczne dla zastosowanego materiału zależne od jego gatunku i rodzaju naprężeń.

Warunki (1) i (2) mają tę samą postać zarówno dla materiału ustroju, jak i spoin. Różnica dotyczy znaczenia i wartości odpowiednich naprężeń obliczeniowych i granicznych, innych dla materiału i innych dla spoin [9].



Rys. 2. Powłokowa konstrukcja dźwigara głównego suwnicy z widocznymi elementami usztywniającymi

Fig. 2. Shell construction of crane main girder with stiffenings

## 2.2. Warunki wytrzymałości zmęczeniowej stalowych ustrojów nośnych suwnic

Warunki wytrzymałości zmęczeniowej mają postać:

$$\sigma_{Sd,x} \leq \sigma_{Rd,x}; \quad \Delta\sigma_{Sd,y} \leq \Delta\sigma_{Rd,y}; \quad \Delta\tau_{Sd} \leq \Delta\tau_{Rd}, \quad (3)$$

dla  $\Delta\sigma_{Sd,x} = \max \sigma_x - \min \sigma_x, \quad (4)$

$$\Delta\sigma_{Sd,y} = \max \sigma_y - \min \sigma_y, \quad (5)$$

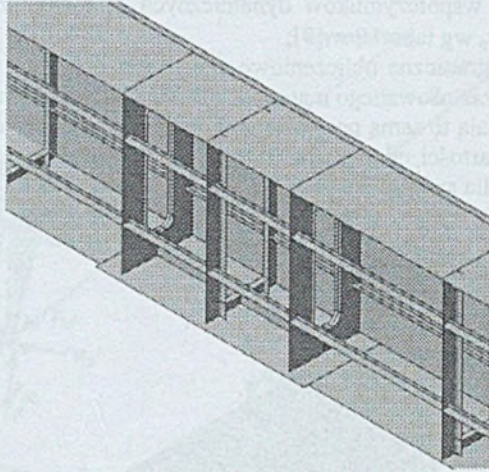
$$\Delta\tau_{sd} = \max \tau - \min \tau, \quad (6)$$

gdzie:

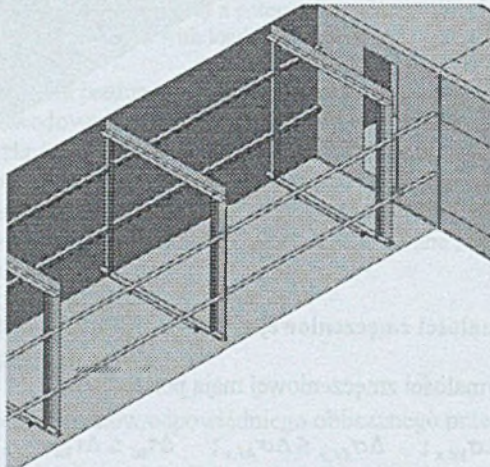
$\Delta\sigma_{sd,x}$ ,  $\Delta\sigma_{sd,y}$ ,  $\Delta\tau_{sd}$  – obliczone maksymalne naprężenia zmęczeniowe w kierunkach „x” i „y” oraz naprężenia styczne;

$\max\sigma_x$ ,  $\max\sigma_y$ ,  $\max\tau$ ,  $\min\sigma_x$ ,  $\min\sigma_y$ ,  $\min\tau$  – ekstremalne wartości naprężeń zmęczeniowych, uzyskane ze skojarzenia A obciążeń, zgodnie z tabl. 10 w [9];

$\Delta\sigma_{Rd,x}$ ,  $\Delta\sigma_{Rd,y}$ ,  $\Delta\tau_{Rd}$  – dopuszczalne naprężenie zmęczeniowe dla danego materiału (lub spoiny), z uwzględnieniem współczynnika liczby obciążeń  $s(m)$  i wykładnika krzywej Wöhlera  $m$  (nazwanego w normie odwrotnością krzywej  $\log\sigma/\log N$ ), odpowiednie dla rozpatrywanego kierunku „x”, „y” lub rodzaju naprężenia (normalnego lub stycznego).



Rys. 3. Fragment dźwigara głównego z przeponami w węźle łączącym go z podporą stałą  
Fig. 3. Main girder with stiffeners in node where it joints the fixed bearing



Rys. 4. Fragment węzła łączącego czołownicę z dźwigarem głównym  
Fig. 4. Node where main girder joints the buffer beam

Dodatkowy warunek wytrzymałości zmęczeniowej dotyczy płaskiego stanu naprężenia, jaki zaistnieje w powłokowym ustroju nośnym i ma postać:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{Sd,x}}{\Delta\sigma_{Rd,x}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sigma_{Sd,y}}{\Delta\sigma_{Rd,y}}\right)^2 - \frac{\Delta\sigma_{Sd,x} \cdot \Delta\sigma_{Sd,y}}{|\Delta\sigma_{Rd,x}| \cdot |\Delta\sigma_{Rd,y}|} + \left(\frac{\Delta\tau_{Sd}}{\Delta\tau_{Rd}}\right)^2 \leq 1,1 \quad (7)$$

Naprężenie dopuszczalne może być określone z użyciem współczynnika liczby obciążeń  $s(m)$  lub z wykorzystaniem klasy dźwigni  $S$  (od  $S_0$  do  $S_9$ ), por. rozdz. 6.5 w [9], także [10].

### 2.3. Warunki wytrzymałości połączeń w dźwigarach blachownicowych

Z uwagi na podobieństwo konstrukcji dźwigarów głównych suwnic (por. rys. 1÷4) do konwencjonalnych dźwigarów stosowanych w budownictwie stalowym wytrzymałość połączeń w tych dźwigarach powinna być sprawdzana zgodnie z przepisami Eurokodu 3 [11], a szczególności z Aneksiem K do tego Eurokodu.

### 2.4. Sprawdzenie stateczności zespołów i elementów specjalnych ustroju nośnego

Stateczność zespołów i powłok ustroju nośnego suwnicy ze względu na pełną analogię do zespołów lub powłok i płyt w typowych konstrukcjach stalowych należy sprawdzać zgodnie z przepisami ww. Eurokodu 3 [11].

## 3. PROBLEMATYKA MODELOWANIA RZECZYWISTEGO USTROJU NOŚNEGO NA PRZYKŁADZIE SUWNICY BRAMOWEJ

Pierwszym krokiem modelowania ustroju jest stworzenie jego modelu geometrycznego. Rysunek 1 przedstawia model geometryczny ustroju nośnego dużej suwnicy bramowej o udźwigu  $Q=45$  t, wykonany w programie SolidWorks [12]. Właściwy jest tu model powłokowy, który wiernie odwzorowuje de facto powłokową konstrukcję ustroju i pozwala zidentyfikować stan wyężenia w węzłach konstrukcyjnych za pomocą oprogramowania MES (metoda elementów skończonych). Takie odwzorowanie jest dużo bardziej skomplikowane i w zasadzie niemożliwe w przypadku modelu belkowego lub bryłowego. Bardziej przydatny do stworzenia modelu geometrycznego i późniejszej adaptacji do obliczeń MES może być pakiet oprogramowania I-DEAS, który łączy cechy programów CAD i profesjonalnych narzędzi MES.

W następnym etapie na podstawie modelu geometrycznego należy opracować model dyskretny do obliczeń metodą elementów skończonych. Do dyskretyzacji modelu geometrycznego należy wykorzystywać powłokowe elementy skończone typu shell, np.: „thin shell linear triangle” lub „thin shell linear quadrilateral”. Wymienione elementy skończone mają 6 stopni swobody w węzłach, co zapewnia dobrą zgodność warunków brzegowych.

Kolejnym etapem numerycznego wymiarowania jest określenie i skojarzenie obciążeń zgodnie z [3] oraz wprowadzenie ich jako obciążeń zewnętrznych do dyskretnego powłokowego modelu ustroju. W ten sposób za pomocą MES można wyznaczyć odpowiednie składowe stanu naprężenia, np.:  $\sigma_{Sd,x}$ ,  $\sigma_{Sd,y}$ ,  $\tau_{Sd}$  w poszczególnych węzłach ustroju, takich jak np.: na rys. 2-4 i sprawdzić warunki wytrzymałości (1) i (2) zapewniające poprawne wymiarowanie rozpatrywanego ustroju nośnego.

#### 4. PODSUMOWANIE

Ustroje nośne suwnic są złożonymi cienkościennymi konstrukcjami powłokowymi, które w stadium projektowania podlegają sprawdzeniu warunków wytrzymałości, trwałości i stateczności wg kryteriów norm europejskich.

Do wymiarowania tych ustrojów należy i można wykorzystywać MES. Jednak warunkiem takiego podejścia jest opracowanie adekwatnego modelu numerycznego rzeczywistego ustroju, który w preprocesorach MES jest niezwykle pracochłonny. W związku z tym należałoby opracować relatywnie szybką i numerycznie spójną transformację geometrycznego modelu ustroju (por. rys. 1-4) do modelu numerycznego, która umożliwiałaby szybką dyskretyzację modelu i możliwie krótki czas prototypowania ustroju projektowanej suwnicy.

#### Literatura

1. Markusik S.: Wyznaczanie obciążeń konstrukcji stalowych dźwignic na podstawie norm europejskich. *Transport Przemysłowy* nr 2(4)/2001, s. 22-29.
2. Markusik S.: Obciążenia od wiatru w konstrukcjach stalowych dźwignic zgodne z normami europejskimi. *Transport Przemysłowy* nr 3(5)/2001, s. 32-35.
3. prEN 13001-2:1998. Dźwignice. Zasady projektowania. Część 2: Obciążenia.
4. Grabowski E., Kulig J.: Trwałościowe wymiarowanie ustrojów nośnych dźwignic w praktyce. *Transport Przemysłowy* nr 1/2004.
5. Chmurawa M., Gąska D.: Problemy wymiarowania ustrojów nośnych dla przejezdnych podwieszonych urządzeń transportowych. *Transport Przemysłowy* nr 2/2004, s. 6-9.
6. Smolnicki T., Rusiński E., Czmochoowski J.: Wybrane problemy wymiarowania elementów nośnych podwozi maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego. *Przegląd Mechaniczny* nr 1/2004.
7. Rusiński E., Czmochoowski J., Smolnicki T.: Zaawansowana metoda elementów skończonych w ustrojach nośnych maszyn. Oficyna Wyd. Pol. Wroc., Wrocław 2000.
8. prEN 13001-1:2000. Dźwignice. Zasady projektowania. Część 1: Postanowienia ogólne oraz wymagania.
9. prEN 13001-3.1:1999. Dźwignice. Zasady projektowania. Część 3.1: Naprężenia dopuszczalne oraz sprawdzanie wytrzymałości konstrukcji stalowych.
10. Markusik S.: Nowa klasyfikacja dźwignic odpowiadająca normom Unii Europejskiej. *Transport Przemysłowy* nr 1(3)/2001.
11. ENV 1993-1-1: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1.1: Ogólne zasady oraz zasady budowy.
12. Pakiet oprogramowania SolidWorks 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Antoniak

#### Abstract

The load-carrying structures of cranes are complex thin-walled structures which in stage of design should be checked according to strength, durability and stability criterions. The dimensioning of this structures should and it is possible by FEM.