

Bartłomiej NOWIŃSKI¹

Opiekun naukowy: Arkadiusz TRĄBKA²

ANALIZA WPŁYWU STRUKTURY WZMOCNIENÍ NA WYBRANE WŁASNOŚCI SKRZYNKOWEJ KONSTRUKCJI RAMY NOŚNEJ ŻURAWIA SAMOCHODOWEGO

Streszczenie: Przedstawiono modele geometryczne i obliczeniowe dziewięciu wariantów ramy nośnej żurawia samochodowego. Warianty zróżnicowano z uwagi na rozmieszczenie, kształt oraz przekrój elementów wzmacniających szkielet ramy o konstrukcji skrzynkowej. Przy użyciu programu NX Nastran przeprowadzono analizę wpływu struktury wzmocnień na wytrzymałość oraz sztywność ramy. Ocenie poddano także wpływ modyfikacji na własności dynamiczne konstrukcji.

Słowa kluczowe: rama nośna żurawia samochodowego, metoda elementów skończonych, analiza wytrzymałościowa, analiza modalna

INFLUENCE OF REINFORCEMENTS ON SELECTED PROPERTIES OF BOX STRUCTURE CARRIER FRAME OF TRUCK CRANE

Summary: The geometrical and computational models of nine variants of a box structure carrier frame of a truck crane are presented. The variants were differentiated due to the placement, shape and cross-section of the frame reinforcing elements. The analysis of the impact of the reinforcements on the strength and stiffness of the frame was carried out using the NX Nastran software. The effect of the modifications on the dynamic properties of the structure was also evaluated.

Keywords: truck crane carrier frame, finite element method, strength analysis, modal analysis

1. Wprowadzenie

Jedną z powszechnie stosowanych metod zapewnienia mobilności żurawi stanowi ich zabudowa na podwoziach samochodów ciężarowych. Zabudowa żurawi na

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: Komputerowe Wspomaganie Konstruowania i Wytwarzania, bnowinski95@wp.pl

² dr. inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, atrabka@ath.bielsko.pl

podwoziach samochodów ciężarowych wymaga użycia struktur wsporczych o dużej sztywności, pośredniczących w przenoszeniu obciążeń z nadwozi na podłoże oraz gwarantujących stateczność konstrukcji. W żurawiach samochodowych funkcję taką pełnią ramy nośne.

Ramy nośne żurawi samochodowych występują jako konstrukcje otwarte – belkowe, złożone z podłużnic i poprzecznic, a także jako konstrukcje zamknięte - skrzynkowe, posiadające wewnętrzne uźebrowanie [1]. Ramy nośne żurawi z założenia powinny charakteryzować się bardzo dużą sztywnością, w związku z czym istniejące konstrukcje wykonywane są albo z profili o wysokich wartościach wskaźników wytrzymałości przekrojów na zginanie i skręcanie, albo z blach o znacznych grubościach, co zawsze oznacza duże masy konstrukcji oraz wysokie koszty. Pomimo stosowania teoretycznie bardzo wytrzymałych materiałów, w ramach żurawi pojawiają się pęknięcia [2]. Chociaż uszkodzenia ram najczęściej mają charakter zmęczeniowy, możliwe jest wydłużenie okresu ich bezawaryjnej eksploatacji poprzez odpowiednie zaprojektowanie konstrukcji [3], albo zaproponowanie modyfikacji istniejących struktur.

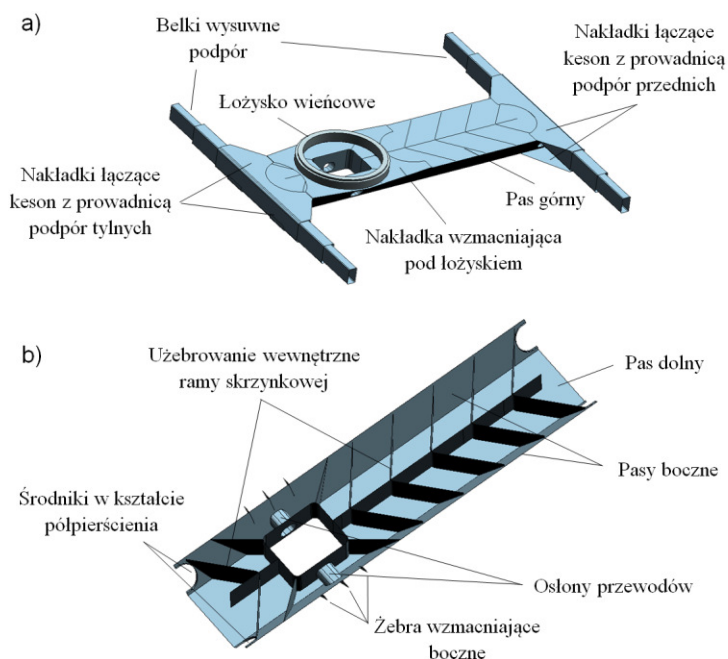
W niniejszej pracy zaproponowano różne modyfikacje dotyczące rozmieszczenia, kształtu oraz przekroju elementów wzmacniających szkielet ramy o konstrukcji skrzynkowej, a następnie przeprowadzono analizę wpływu tych zmian na jej wytrzymałość oraz sztywność. Ocenie poddano także wpływ zaproponowanych modyfikacji na własności dynamiczne konstrukcji.

2. Modele obliczeniowe rozpatrywanych wariantów ramy nośnej

Modele obliczeniowe opracowano na podstawie modeli geometrycznych wykonanych w programie Siemens NX Nastran. Pierwszy z modeli opracowano na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej układu podporowego żurawia HYDROS T-161. Konstrukcję tą przyjęto jako model odniesienia dla wprowadzanych modyfikacji i oznaczono jako wariant 1 (rys. 1), (tabela 1). Następnie zaproponowano osiem modyfikacji rozmieszczenia, kształtu lub przekroju elementów wzmacniających szkielet ramy, a odpowiadające im modele oznaczono jako warianty 2-9 (tabela 2).

Tabela 1. Grubości elementów ramy i belek wysuwnych podpór

Element	Grubość [mm]
Pas górny, dolny oraz pasy boczne	8
Nakładka wzmacniająca pod łożyskiem wieńcowym	8
Wewnętrzne uźebrowanie ramy	6
Ścianki belek wysuwnych - górne i dolne	20
Ścianki belek wysuwnych - boczne	10
Nakładki łączące keson z prowadnicą podpór przednich i tylnych	8
Żebra wzmacniające boczne	8



Rysunek 1. Rama nośna oraz belki wysuwne podpór żurawia HYDROS T-161:
a) widok ogólny, b) uźebrowanie wewnętrzne

Tabela 2. Warianty modeli obliczeniowych ramy nośnej o konstrukcji skrzynkowej (cz. 1)

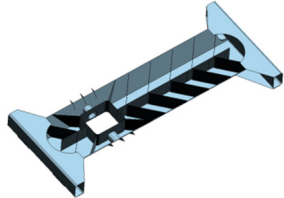
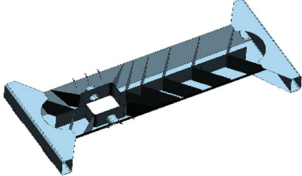
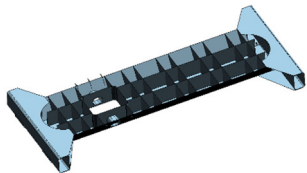
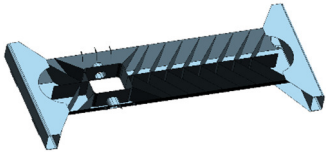
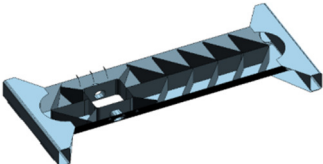
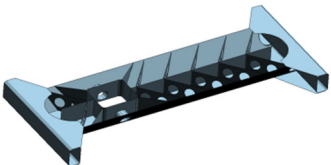


















Wariant modelu	Opis wariantu (modyfikacji)	Schemat/dane
1	Oryginalna konstrukcja ramy żurawia HYDROS T-161	
2	Zwiększono grubość wybranych wzmocnień:	<ul style="list-style-type: none"> • nakładki wzmacniającej pod łożysko z 8 do 12 mm, • nakładek łączących keson z prowadnicami podpór z 8 do 12 mm, • wewnętrznego uźebrowania z 6 do 9 mm.
3	Zwiększono zagęszczenie żeber w obrębie wieńca łożyska	

Tabela 2. Warianty modeli obliczeniowych ramy nośnej o konstrukcji skrzynkowej (cz. 2)

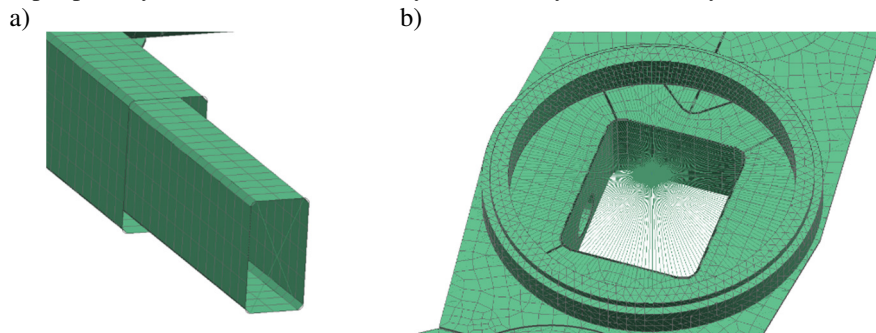
Wariant modelu	Opis wariantu	Schemat/dane										
4	Zmodyfikowano uźebrowanie wewnętrzne											
5	Zwiększono liczbę żeber wzmacniających											
6	Odwrócono kierunek ułożenia żeber											
7	W żebrach wykonano po dwa otwory $\varnothing 160$ mm											
8	Zmodyfikowano nakładki łączące keson z prowadnicami podpór	<table border="0"> <tr> <td style="text-align: center;">Przed modyfikacją</td> <td style="text-align: center;">Po modyfikacji</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Płyta górna</td> <td style="text-align: center;">Płyta górna</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Płyta dolna</td> <td style="text-align: center;">Płyta dolna</td> </tr> </table>	Przed modyfikacją	Po modyfikacji			Płyta górna	Płyta górna			Płyta dolna	Płyta dolna
Przed modyfikacją	Po modyfikacji											
												
Płyta górna	Płyta górna											
												
Płyta dolna	Płyta dolna											
9	Zmodyfikowano nakładkę wzmacniającą pod łożysko	<table border="0"> <tr> <td style="text-align: center;">Przed modyfikacją</td> <td style="text-align: center;">Po modyfikacji</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Przed modyfikacją	Po modyfikacji								
Przed modyfikacją	Po modyfikacji											
												

2.1. Zasady przygotowania modeli obliczeniowych

Do budowy modeli obliczeniowych użyto głównie elementów powłokowych (ang. SHELL). Jedynie łożysko wieńcowe zdyskretyzowano przy użyciu elementów bryłowych (ang. SOLID). Podczas opracowywania modeli przyjęto pewne założenia upraszczające [4- 6]:

- Modele pozbawiono zbędnych elementów np. uchwytów mocujących;

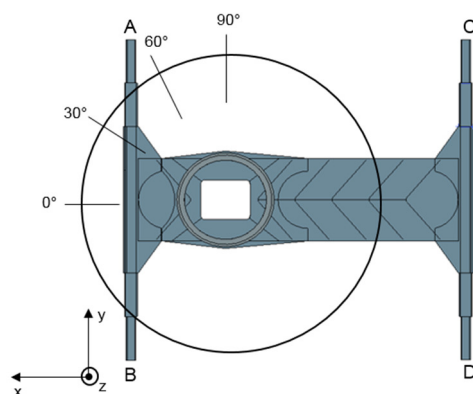
- Pominięto otwory na przewody, otwory na śruby oraz inne mniejsze otwory i sfazowania;
- Uproszczono połączenia spawane przez zastosowanie połączeń elementami sztywnymi typu RBE2;
- Pomiędzy ściankami elementów podpór zastosowano połączenia typu C-GAP [7];
- Na górnej płaszczyźnie pierścienia łożyska wieńcowego oraz zakończeniach belek podporowych zastosowano elementy idealnie sztywne RBE2 (rys. 2).



Rysunek 2. Miejsca użycia elementów sztywnych typu RBE2: a) na zakończeniach belek podporowych, b) na górnej płaszczyźnie pierścienia łożyska wieńcowego

2.2. Warunki brzegowe i dobór obciążeń

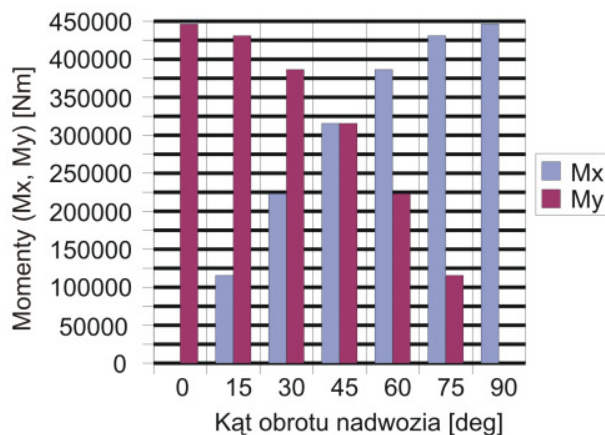
Podparcie modelu obliczeniowego zrealizowano przez wprowadzenie więzów w miejscach zakończeń belek podporowych (rys. 2, 3). Odebrano możliwość przemieszczeń w kierunkach osi X, Y, Z w podporze A, w kierunkach X, Z w podporze B, w kierunkach Y, Z w podporze C oraz w kierunku osi Z w podporze D. Pozostawiono natomiast pełną swobodę obrotu we wszystkich punktach podparcia.



Rysunek 3. Oznaczenie punktów podparcia oraz kątów obrotu nadwozia, dla których przeprowadzono obliczenia

Obciążenia ramy przyjęto na podstawie pracy [6]. Rozpatrzono najbardziej niekorzystny wariant konfiguracji, gdy wysięgnik o długości 8 m, przy najmniejszym wysięgu (3 m), obciążony jest ładunkiem 16 ton. Obciążenia od obrotowego nadwozia

żurawia w postaci siły pionowej o stałej, niezależnej od kąta obrotu wartości ($F_y = 240680 \text{ N}$) oraz momentów skręcających M_x , M_y (rys. 4), przyłożono do górnego pierścienia łożyska za pośrednictwem tzw. „pajęczyny belek” (rys. 2). Analizy przeprowadzono dla kątów obrotu nadwozia oznaczonych na rys. 3.



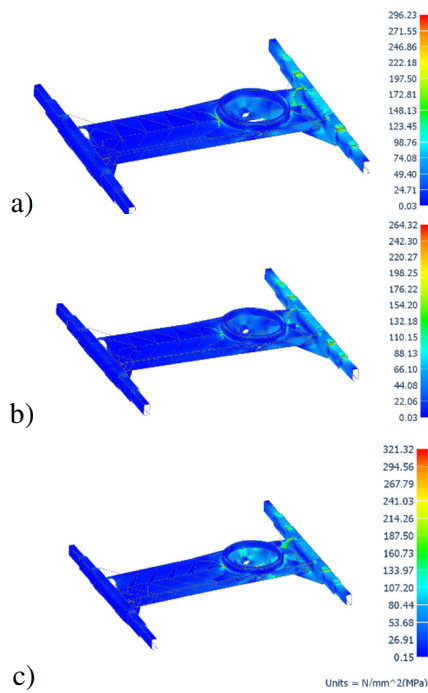
Rysunek 4. Wykres momentów działających na ramę [6]

3. Analiza wytrzymałości i sztywności rozpatrywanych wariantów ramy nośnej

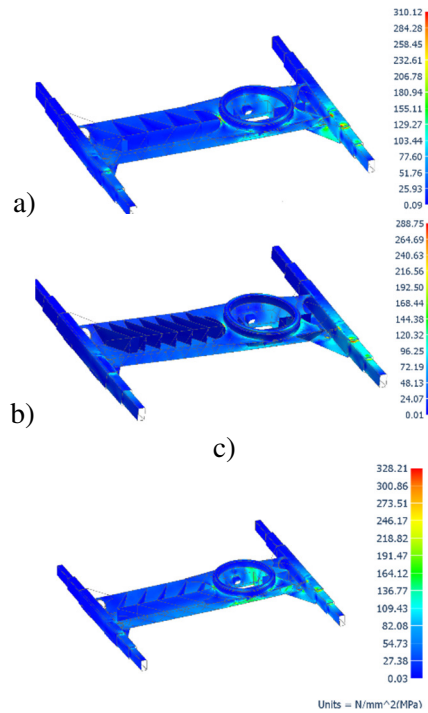
Analizy rozpatrywanych wariantów ramy przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Siemens NX Nastran. W pierwszej kolejności dla każdego wariantu wykonano obliczenia naprężeń zredukowanych (wg hipotezy Hubera–Misesa–Hencky’ego), a następnie porównano ich maksymalne wartości. Na kolejnych rysunkach przedstawiono przykładowe wyniki analiz dla modelu odniesienia (wariantu 1) oraz odpowiednio wariantów o najmniejszych i największych naprężeniach zredukowanych. Wyniki zaprezentowano dla kątów obrotu 0° i 90° . Zgodnie z powyższym, na rys. 5 przedstawiono przykładowe warstwy naprężeń zredukowanych dla wariantów 1, 2 i 6, przy kącie obrotu 0° , natomiast na rys. 6 dla wariantów 1, 5 i 6, przy kącie obrotu 90° . Porównania maksymalnych naprężeń zredukowanych dla rozpatrywanych wariantów ramy dokonano na rys. 7.

Z porównania maksymalnych naprężeń zredukowanych (rys. 7) wynika, że najkorzystniejszą pod względem wytrzymałościową modyfikację zapewnia wariant 2, natomiast efekt przeciwny występuje w przypadku wariantu 6.

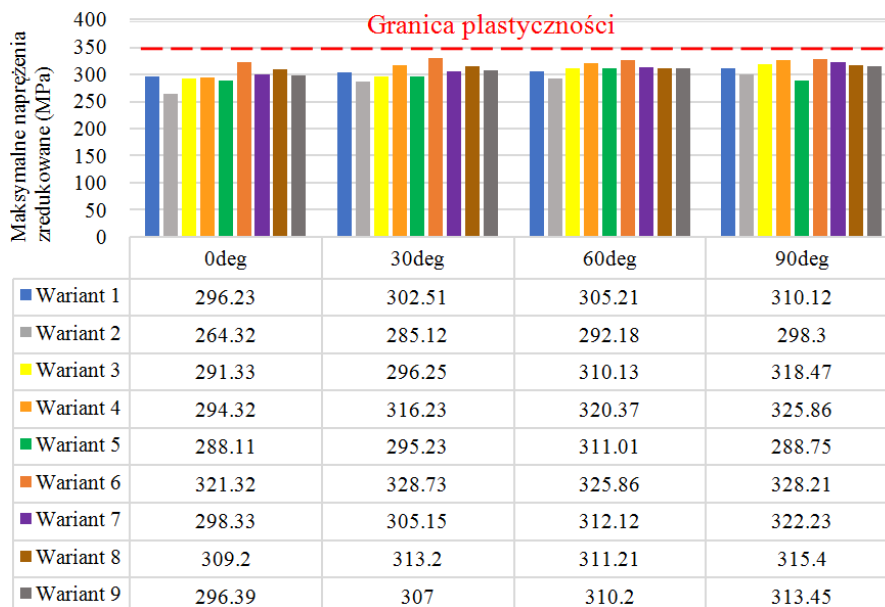
Aby ustalić, jak pod wpływem wprowadzanych modyfikacji zmienia się sztywność ramy, dla każdego wariantu modelu wykonano obliczenia przemieszczeń wypadkowych, a następnie porównano ich maksymalne wartości. Na kolejnych rysunkach przedstawiono przykładowe wyniki analiz dla modelu odniesienia (wariantu 1) oraz odpowiednio wariantów o najmniejszych i największych przemieszczeniach wypadkowych. Wyniki zaprezentowano dla kątów obrotu 0° i 90° . Zgodnie z powyższym, na rys. 8 przedstawiono przykładowe przemieszczenia wypadkowe dla wariantów 1, 2 i 4, przy kącie obrotu 0° , natomiast na rys. 9 dla wariantów 1, 2 i 6, przy kącie obrotu 90° . Porównania maksymalnych przemieszczeń wypadkowych dla rozpatrywanych wariantów ramy dokonano na rys. 10.



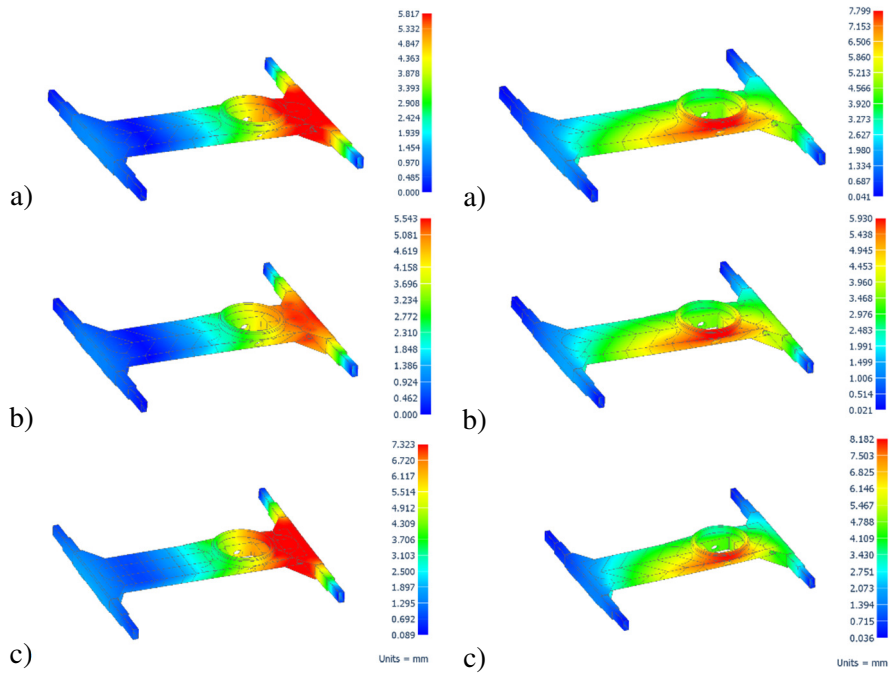
Rysunek 5. Naprężenia zredukowane dla wariantów: a) 1, b) 2 i c) 6, przy kącie obrotu 0°



Rysunek 6. Naprężenia zredukowane dla wariantów: a) 1, b) 5 i c) 6, przy kącie obrotu 90°

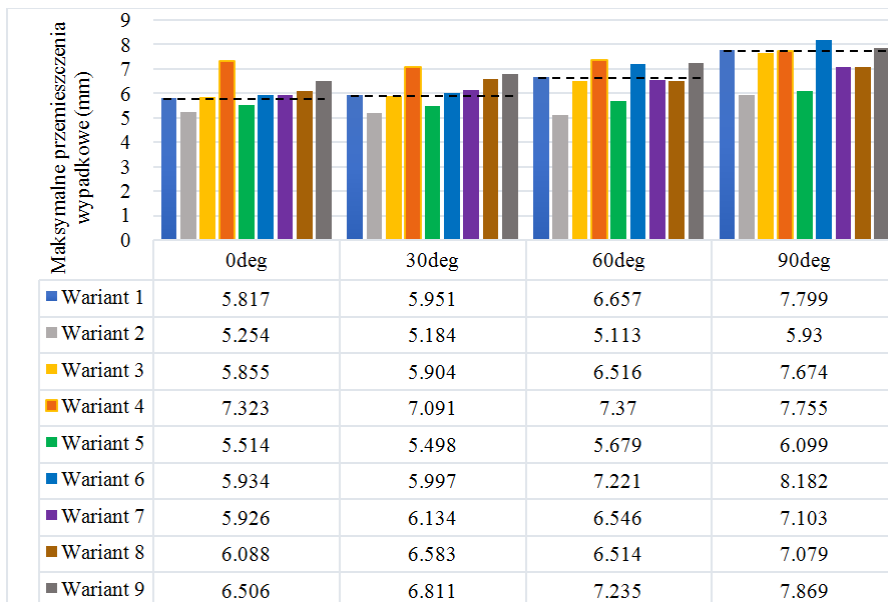


Rysunek 7. Porównanie maksymalnych naprężeń zredukowanych



Rysunek 8. Przemieszczenia wypadkowe dla wariantów: a) 1, b) 2 i c) 4, przy kącie obrotu 0°

Rysunek 9. Przemieszczenia wypadkowe dla wariantów: a) 1, b) 2 i c) 6, przy kącie obrotu 90°

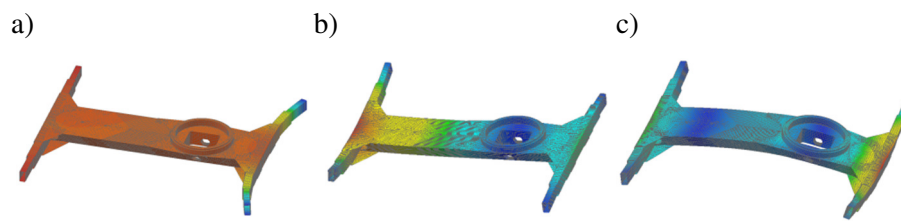


Rysunek 10. Porównanie maksymalnych przemieszczeń wypadkowych

Z porównania maksymalnych przemieszczeń wypadkowych (rys. 10) wynika, że największą sztywność zapewnia wariant 2 wykonania ramy nośnej, natomiast najmniejsza sztywność charakteryzuje ramę w wariantcie 4.

4. Analiza modalna

Częstotliwości oraz postacie drgań własnych dla rozpatrywanych wariantów ramy nośnej wyznaczono przy użyciu modułu do analizy modalnej zaimplementowanego w oprogramowaniu Siemens NX Nastran. Zastosowano takie same warunki brzegowe jak w przypadku analiz wytrzymałościowych. Biorąc pod uwagę częstotliwości wymuszeń generowane przez silnik samochodu oraz prędkości ruchów roboczych np. wciągarki, obrotu nadwozia, czy też zmiany wysięgu, poszukiwano częstotliwości własnych z przedziału od 0 do 100 Hz. Przykładowe postacie drgań dla wariantu 1 przedstawiono na rys. 11. W tabeli 3 zamieszczono natomiast porównanie częstotliwości drgań własnych odpowiadających rozpatrywanym wariantom.



Rysunek 11. a) pierwsza, b) druga, c) trzecia postać drgań wariantu 1

Tabela 3. Częstotliwości drgań własnych rozpatrywanych wariantów ramy nośnej

Częstotliwość	Wariant modelu								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f₁ [Hz]	14.054	13.726	14.070	12.322	12.914	14.749	14.499	13.483	13.240
f₂ [Hz]	35.800	35.299	32.277	30.951	33.819	37.112	37.704	35.582	35.634
f₃ [Hz]	63.158	64.083	62.955	60.886	65.892	58.926	63.310	63.071	62.135
f₄ [Hz]	73.228	75.757	64.408	64.444	76.276	71.360	75.526	70.962	73.342
f₅ [Hz]	95.758	97.912	76.143	76.047	98.131	95.728	96.228	90.166	95.767

Na podstawie analizy modalnej ustalono, że spośród pierwszych pięciu postaci drgań, tylko trzecia postać dotyczy odkształceń ramy nośnej, natomiast pozostałe cztery dotyczą odkształceń belek podporowych. Trzecia postać drgań w przypadku każdego wariantu występuje przy częstotliwości znacznie wyższej niż najwyższa z częstotliwości wymuszeń, co zabezpiecza konstrukcję przed możliwością wystąpienia rezonansu. Rezonans jest natomiast możliwy w przypadku ramy wariantów 3, 4 i 5, gdzie drugie z częstotliwości własnych znajdują się w obszarze częstotliwości generowanych przez silnik samochodu ciężarowego (16.7-33 Hz).

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono modele geometryczne i obliczeniowe dziewięciu wariantów ramy nośnej żurawia samochodowego HYDROS T-161. Warianty zróżnicowano względem rzeczywistej konstrukcji z uwagi na rozmieszczenie, kształt oraz przekrój elementów wzmacniających szkielet ramy o konstrukcji skrzynkowej. Dyskretyzację modeli oraz analizę metodą elementów skończonych przeprowadzono przy użyciu programu Siemens NX Nastran. Analizowano wpływ zmian konstrukcyjnych na wytrzymałość oraz sztywność ramy. Ocenie poddano także wpływ zaproponowanych modyfikacji na własności dynamiczne konstrukcji.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że:

- Najmniejsze wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych oraz najmniejsze przemieszczenia wypadkowe występują w przypadku wariantów 2 i 5. Wprowadzone zmiany w konstrukcjach tych ram spowodują jednak nieznaczne zwiększenie ich masy oraz kosztów produkcji;
- Maksymalne naprężenia zredukowane oraz przemieszczenia wypadkowe wariantu 7 są zbliżone do wartości wyznaczonych dla wariantu 1, jednak przez wprowadzenie modyfikacji w postaci wycięcia otworów w żebrach zmodyfikowana konstrukcja będzie lżejsza i mniej materiałochłonna;
- Spośród wybranych wariantów, których modyfikacje dają poprawę wytrzymałości oraz sztywności ramy, tylko w przypadku wariantów 2 i 7 częstotliwości drgań własnych nie pokrywają się z częstotliwościami generowanymi przez silnik samochodu ciężarowego, co pozwala uznać je za prawidłowe rozwiązania konstrukcyjne.

LITERATURA

1. RUSIŃSKI E.: Zasady projektowania konstrukcji nośnych pojazdów samochodowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
2. LAURENTIU S.: Induce stress of the cracks in the chassis structure of the mobile crane used in constructions on any type of terrain. 5th Int. Conference Structural Integrity of Welded Structures, Timisora, Romania 2007, 1-14.
3. ZHANG W., PEI B., MA B., CHEN J., DU X.: The Optimal Design and Modal Analysis for a Truck Crane Frame. Future Communication, Computing, Control and Management (LNEE 141), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, 337-342.
4. BORKOWSKI W., KONOPKA S., PROCHOWSKI L.: Dynamika maszyn roboczych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
5. TRĄBKA A.: Dobór uproszczeń podczas opracowywania modeli numerycznych żurawi z zastosowaniem metody elementów skończonych. Teoria maszyn i mechanizmów, T.2, Wyd. AGH 2004, 91-96.
6. TRĄBKA A., CIEŚLAR A.: Wpływ postaci konstrukcyjnej ramy nośnej żurawia samochodowego na odkształcenie pierścienia łożyska wieńcowego, Modelowanie Inżynierskie 37 (2009) 6, 257-264.
7. RAKOWSKI G., KACPRZYK Z.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.