

Marek Chodurski

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Lubelska,
ul. Nadbystrzycka 36, 20–618 Lublin, Polska, email: chodurski@wp.pl

Hubert Dębski

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, Politechnika Lubelska,
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Polska, email: h.debski@pollub.pl

Sylwester Samborski

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Lubelska,
ul. Nadbystrzycka 36, 20–618 Lublin, Polska, email: s.samborski@pollub.pl

Andrzej Teter

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Lubelska,
ul. Nadbystrzycka 36, 20–618 Lublin, Polska, email: a.teter@pollub.pl

Numeryczna analiza wytrzymałości ramy nośnej uniwersalnej głowicy robota paletyzującego

Słowa kluczowe: MES, paletyzacja, głowica robota, rama nośna, modelowanie, chwytak

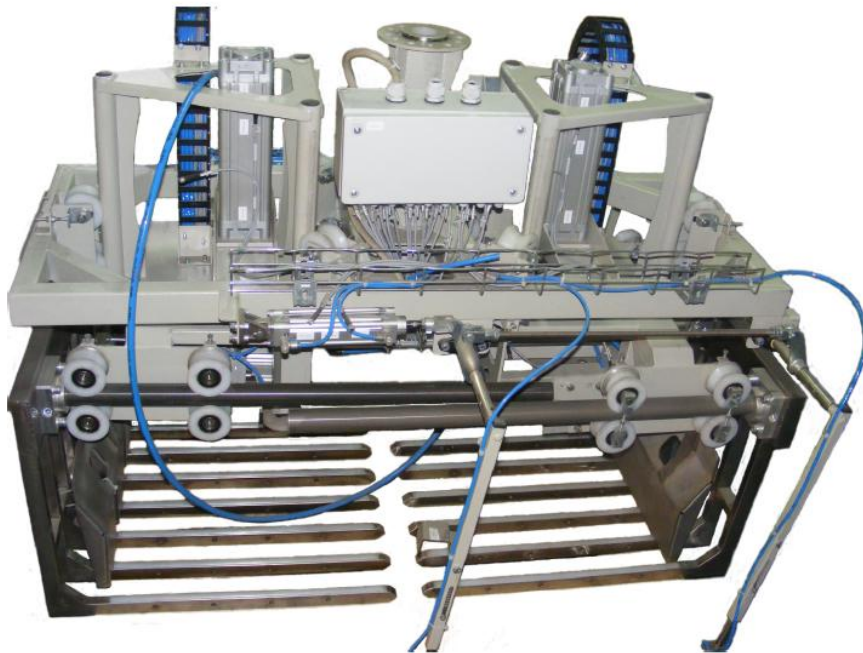
Streszczenie: W prezentowanej pracy zajęto się numeryczną analizą wytrzymałościową ustroju nośnego głowicy robota przemysłowego, która służy do paletyzacji worków. Obliczenia prowadzono z zastosowaniem metody elementów skończonych, umożliwiającej odwzorowanie rzeczywistych warunków eksploatacyjnych pracy robota w procesie paletyzacji. W obliczeniach przyjęto, że głowica jest przystosowana do układania dwóch worków jednocześnie o maksymalnych wymiarach gabarytowych: 800mm, 500mm, 140mm oraz masie do 50kg każdy. Stosowane obecnie głowice paletyzujące są ciężkie, co znacznie podnosi koszty procesu paletyzacji. Celem pracy była analiza numeryczna istniejącej głowicy robota paletyzującego, na podstawie której możliwe będzie zaprojektowanie konstrukcji o zoptymalizowanych parametrach eksploatacyjnych. Prowadzone prace nad redukcją masy własnej głowicy robota paletyzującego są istotne ze względu na nośność robota przemysłowego, wydajność oraz koszt procesu paletyzacji.

1. Wprowadzenie

Postępujący proces automatyzacji procesów pakowania oraz paletyzowania [2-4, 10-11,19] spowodował duże zapotrzebowanie na uniwersalne i lekkie chwytaki głowic robotów przemysłowych, które w zadany sposób przenoszą i układają produkty na paletach transportowych. Do podstawowych zadań chwytaków należy uchwycenie obiektu manipulowanego, utrzymanie go podczas przenoszenia oraz odpowiednie uwolnienie

w określonym miejscu. Chwytnik jest narzędziem adaptowanym do ramienia robota i stanowi on odrębny zespół elementów współpracujących ze sobą [14]. Na prawidłowe uchwycenie przedmiotu mają m.in. wpływ: kształt przedmiotu, masa, położenie środka ciężkości, właściwości powierzchni w miejscu uchwycenia manipulowanego obiektu, możliwości chwytne chwytaka oraz różnica położenia obiektu gotowego do uniesienia względem miejsca pobrania. Drugą fazą pracy chwytaka jest trzymanie obiektu podczas manipulacji. W zakresie pracy tego etapu powstają przyspieszenia transportowe, których wartości mają istotny wpływ na obciążenie elementów nośnych badanego obiektu. Ostatnim etapem pracy jest proces uwolnienia detalu w miejscu docelowym rozpoczynający się od najechania głowicy robota na pozycję końcową i precyzyjnego zatrzymania się. Jeżeli uwolnienie detalu nastąpiło bez przeszkód (nie zareagowały systemy chroniące przed kolizją) to robot wykonuje odjazd, celem odsunięcia się od przedmiotu manipulowanego.

Przedmiot badań stanowiła głowica robota paletyzującego, wykorzystywanego w procesie pakowania worków. Analizowane urządzenie stanowi rozbudowany wielofunkcyjny chwytak wyposażony w pełni automatyczne sterowanie. Do rozważań przyjęto głowicę paletyzującą firmy Wikpol przedstawioną na rys. 1.



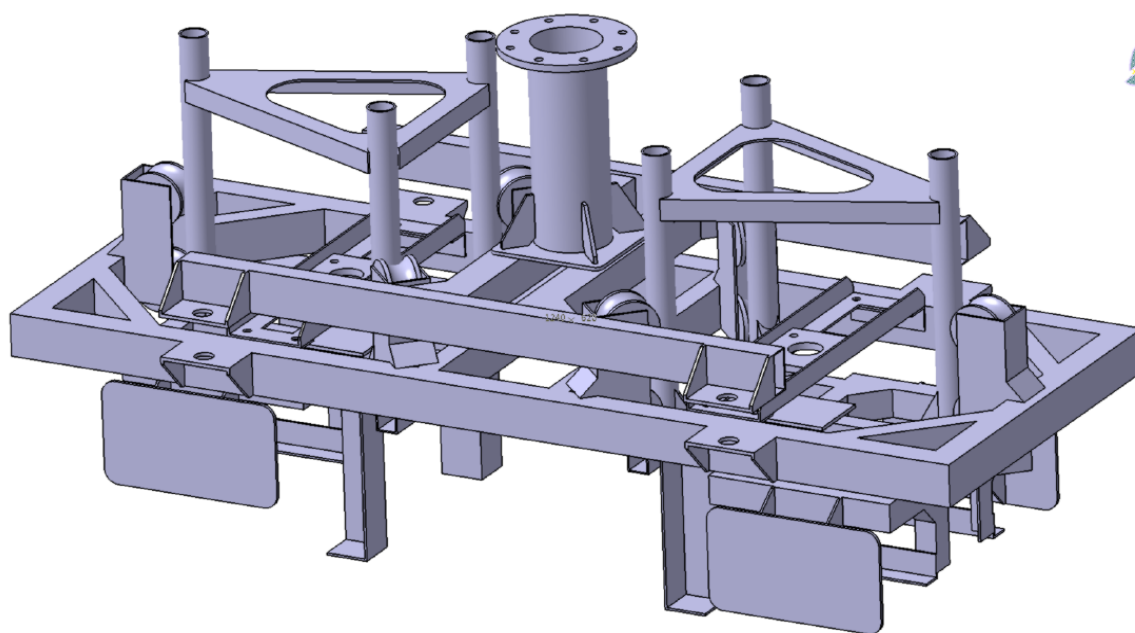
Rys. 1. Głowica paletyzująca firmy Wikpol

Omawiana głowica składa się z kilku kluczowych elementów: głowicy mocującej, ramy nośnej, ramy ruchomej, widel chwytaka oraz docisków dolnego i bocznego. Chwytnik ten można zakwalifikować do grupy chwytaków siłowo - kształtowych. Worki przenoszone przez głowicę podnoszone są za pomocą widel, stanowiących układ szczęk zamykających się na workach od spodu. Podczas transportu worki leżą na widłach oraz jednocześnie są dociskane dociskiem bocznym w kierunku poziomym oraz dociskiem górnym w kierunku pionowym. Pod względem przemieszczania się końcówek chwytanych prezentowana głowica zalicza się do chwytaków imadłowych, na co wskazuje ruch poziomy widel. Elementy ruchome głowicy poruszane są z wykorzystaniem znormalizowanych siłowników pneumatycznych. Rama głowicy mocowana jest bezpośrednio do robota o całkowitym dopuszczalnym udźwigu wynoszącym 250 kg. Głowica paletyzująca w obecnej formie ma masę własną ok. 200 kg, więc współpracując z dedykowanym do niej manipulatorem może unieść jednocześnie dwa worki o masie po 25 kg każdy.

Celem prowadzonych badań było zaprojektowanie lekkiej konstrukcji ramy nośnej, przy zachowanej dużej sztywności, która umożliwi jednocześnie przeniesienie dwóch worków o masie po 50 kg każdy. Projekt nowej głowicy stanowił modyfikację istniejącego rozwiązania konstrukcyjnego, poprzez wyeliminowanie elementów o małym stopniu wyęźnienia, a powodujących istotne zwiększenie masy obiektu. W tym celu szczegółowej analizie wytrzymałościowej poddano elementy o dużej masie, tzn. głowicę mocującą oraz ramę nośną [8-9, 16]. Cały proces modelowania oraz szczegółowe numeryczne obliczenia wytrzymałościowe przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych z zastosowaniem komercyjnego pakietu obliczeniowego ABAQUS® [1, 20].

2. Przedmiot i zakres badań

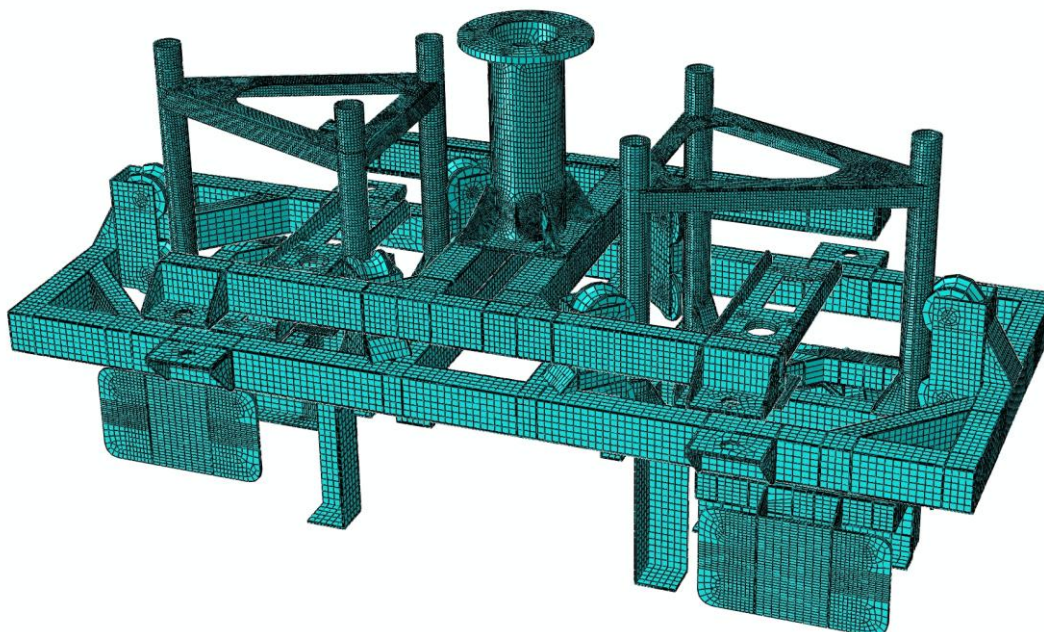
Przedmiot badań stanowiły elementy nośne głowicy paletyzującej firmy Wikpol, bez elementów sterowania oraz nieistotnych ze względów wytrzymałościowych szczegółów konstrukcyjnych. Model geometryczny badanego obiektu (rys. 2) wykonano w formie złożenia na podstawie dokumentacji technicznej urządzenia z wykorzystaniem oprogramowania CAD – CATIA V5. Opracowany model ramy nośnej głowicy paletyzującej stanowił konfigurację urządzenia odpowiadającą warunkom pracy występującym podczas przenoszenia ładunku. Dotyczy to przede wszystkim usytuowania ram ruchomych względem ramy nośnej, jak również ustalenia położenia roboczego środków ciężkości ładunku i wideł.



Rys. 2. Model geometryczny ramy nośnej głowicy paletyzującej

Opracowany model geometryczny głowicy paletyzującej stanowił podstawę opracowania modelu dyskretnego badanego obiektu, umożliwiającego wykonanie obliczeń numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Proces dyskretyzacji modelu geometrycznego przeprowadzono z wykorzystaniem objętościowych elementów skończonych typu *C3D8R*, tzn. ośmiowęzłowych elementów bryłowych ze zredukowanym całkowaniem, posiadających po trzy translacyjne stopnie swobody w każdym węźle [5-7, 12, 17-18]. Zastosowany typ elementu skończonego stanowił element pierwszego rzędu. W celu zapewnienia zgodności pomiędzy całkowitą masą głowicy paletyzującej a opracowanym

modelem dyskretnym konieczne było uwzględnienie masy pozostałych elementów głowicy o łącznej masie wynoszącej 58,2 kg, które pominięto w przygotowanym modelu geometrycznym. Powyższe elementy uwzględniono w postaci mas skupionych przypisanych do określonych obszarów ramy w miejscach ich mocowania. Opracowany model dyskretny głowicy paletyzującej, uwzględniający wzajemne interakcje kontaktowe pomiędzy odpowiednimi elementami modelu, zapewniające właściwą ich współpracę przedstawia rys. 3.



Rys.3. Model dyskretny ramy głowicy paletyzującej z warunkami brzegowymi i wprowadzonym obciążeniem

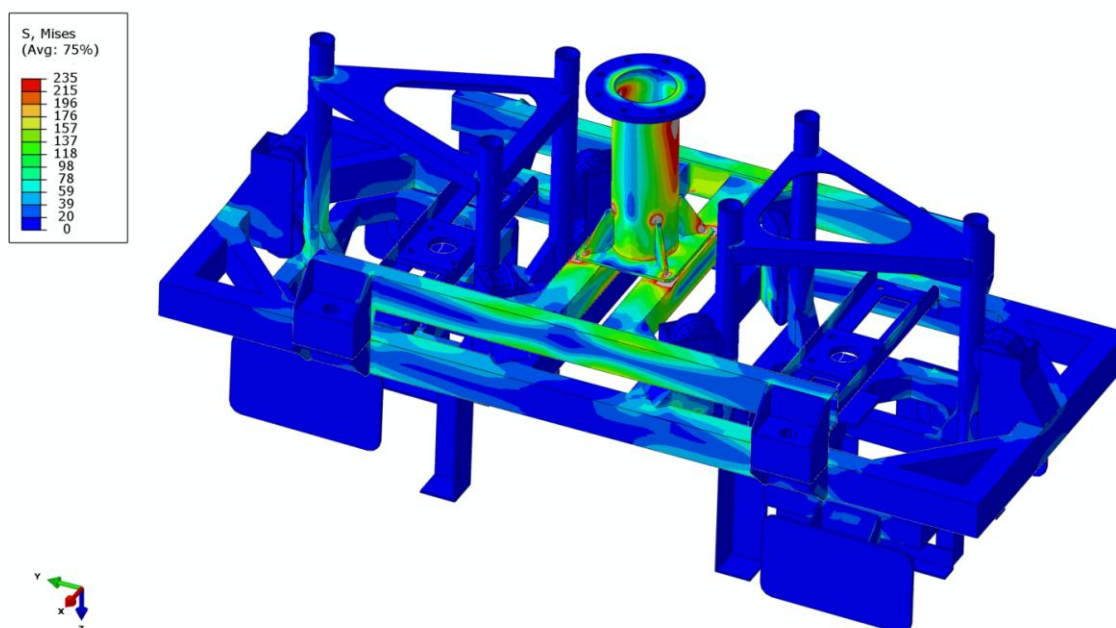
Model opracowanych warunków brzegowych zakładał, że połączenie głowicy paletyzującej z końcówką robota jest utwierdzone. W tym celu węzłom znajdującym się na powierzchni mocowania głowicy zablokowano wszystkie translacyjne stopnie swobody. Przyjęto, że na głowicę nie oddziałują żadne siły zewnętrzne poza ciężarem ładunku oraz masy własnej urządzenia. Ze względu na brak modelu widel, na których bezpośrednio leżą worki podczas transportu, do analizy użyto sumę mas widel i worka oraz wyznaczono wspólny środek ciężkości, wyznaczony z wykorzystaniem odpowiednich funkcji programu CATIA V5. Przeprowadzono obliczenia uwzględniające przypadek obciążenia, gdy głowica przenosi ładunek w postaci dwóch worków o łącznej masie 100 kg. W obliczeniach uwzględniono ciężar własny badanego obiektu, natomiast obciążenie odwzorowujące ruchy manipulacyjne robota zdefiniowano poprzez wprowadzenie przyspieszenia działającego w kierunku poziomym o wartości 40 m/s^2 [13, 15], co odpowiadało maksymalnej wartości opóźnienia uzyskiwanego podczas awaryjnego zatrzymania robota.

W obliczeniach numerycznych przyjęto liniowo-sprężystą charakterystykę materiału ze względu na fakt, że podczas eksploatacji głowicy nie dochodzi do odkształceń trwałych jej elementów. Wszystkie elementy nośne ramy wykonane były ze stali o następujących właściwościach mechanicznych: moduł Younga $E= 210 \text{ GPa}$, liczba Poissona $\nu=0,3$ oraz gęstość $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$, natomiast granica plastyczności konieczna do oceny poziomu wyęczenia elementów nośnych ramy wynosiła $R_e=235 \text{ MPa}$. Dodatkowo założono, że w modelu mogą wystąpić duże przemieszczenia, a więc zagadnienie może być geometrycznie nieliniowe. W prowadzonych obliczeniach zastosowano więc przyrostowo-iteracyjną metodę Newtona-Raphsona [17-18].

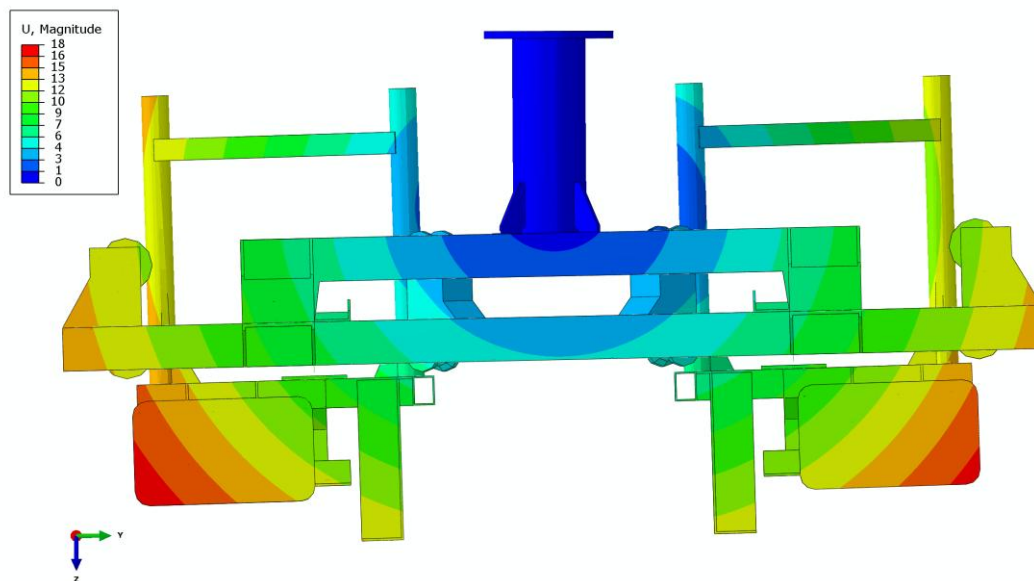
3. Wyniki obliczeń numerycznych

Przeprowadzone obliczenia umożliwiły wyznaczenie rozkładów naprężenia zredukowanego wg hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego [5, 7, 12] w elementach nośnych głowicy oraz określenie poziomów przemieszczenia głowicy w momencie awaryjnego zatrzymania robota. Wyniki opisujące naprężenia zredukowane przedstawiono na rys. 4, zaś przemieszczenia węzłów na rys. 5. Otrzymany ogólny poziom naprężenia zredukowanego w elementach głowicy nie przekracza $\sigma \approx 235 \text{ MPa}$, natomiast zaobserwowane lokalne spiętrzenia naprężeń w okolicy żeber usztywniających rurę w głowicy mocującej, wskazują na wyraźne przekroczenie w tych miejscach granicy plastyczności. Skalę wyświetlanych map naprężenia ograniczono do 235 MPa w celu wyraźniejszego rozłożenia warstw konturowych. Maksymalne przemieszczenie węzłów modelu występuje na krańcach ramy ruchomej i wynosi 18 mm.

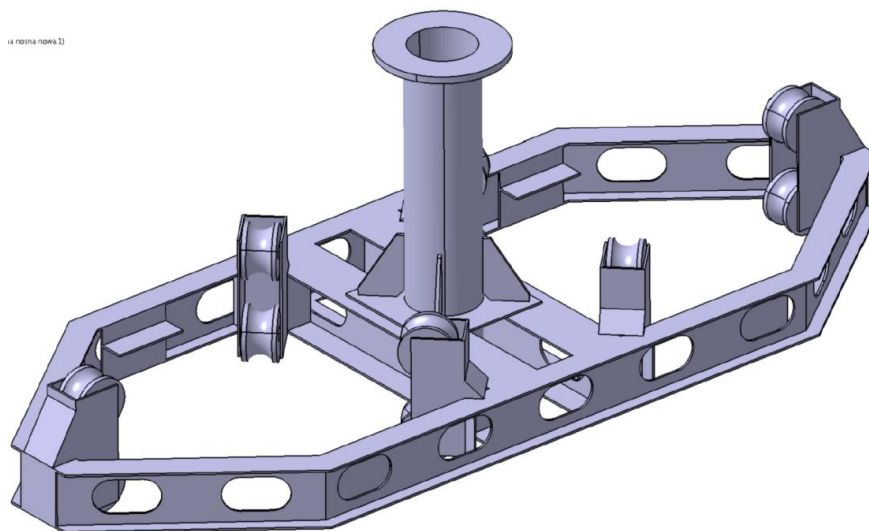
Charakterystycznym zachowaniem badanego ustroju nośnego było powstawanie wysokich naprężeń w modelu głowicy mocującej, przy jednoczesnych bardzo niskich naprężeniach w ramie nośnej. W związku z tym, że głowica mocująca odpowiada jedynie za zamocowanie chwytaka do kiści robota, postanowiono z niej zrezygnować, natomiast funkcję mocowania dodać do ramy nośnej. Wyeliminowanie modelu głowicy mocującej w praktyce postanowiono dokonać poprzez wydłużenie rury mocującej głowicę do kiści robota tak, aby połączyć ją z ramą nośną, nie zmieniając przy tym odległości od kiści robota do ramy nośnej. Poza tym niskie wyteżenie profili zamkniętych budujących ramę nośną było powodem podjęcia próby zastąpienia ich profilami otwartymi w postaci dwuteowników. W środnikach dwuteowników wykonano otwory, które nie powinny osłabić wytrzymałości tych elementów, natomiast wpływają na zmniejszenie masy. W zaproponowanym rozwiązaniu zdecydowano się przyjąć stal o podwyższonej w stosunku do poprzedniego rozwiązania wartości granicy plastyczności wynoszącej $R_e = 350 \text{ MPa}$. Na rys. 6 przedstawiono zmodyfikowaną ramę nośną, która pozwoli zmniejszyć masę głowicy paletyzującej o około 11 kg i jednocześnie w znacznym stopniu uprościć budowę całej głowicy.



Rys. 4. Mapa naprężenia zredukowanego według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego



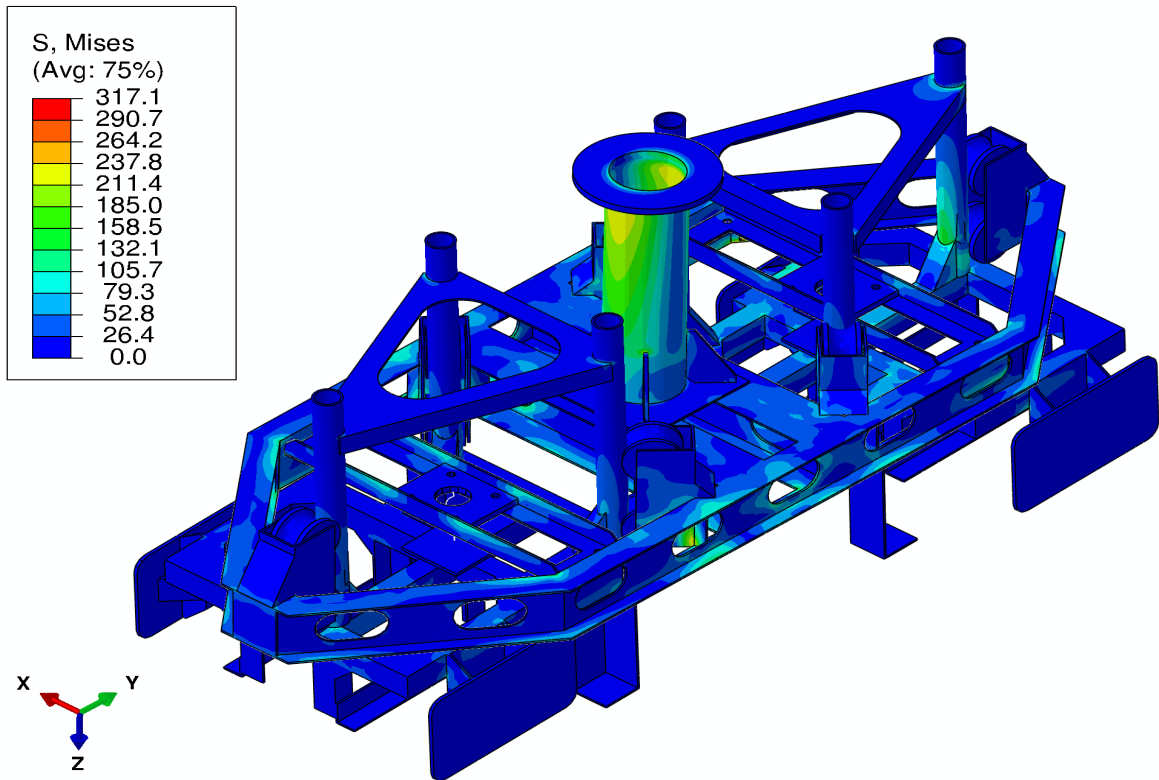
Rys. 5. Przemieszczenia węzłów modelu numerycznego



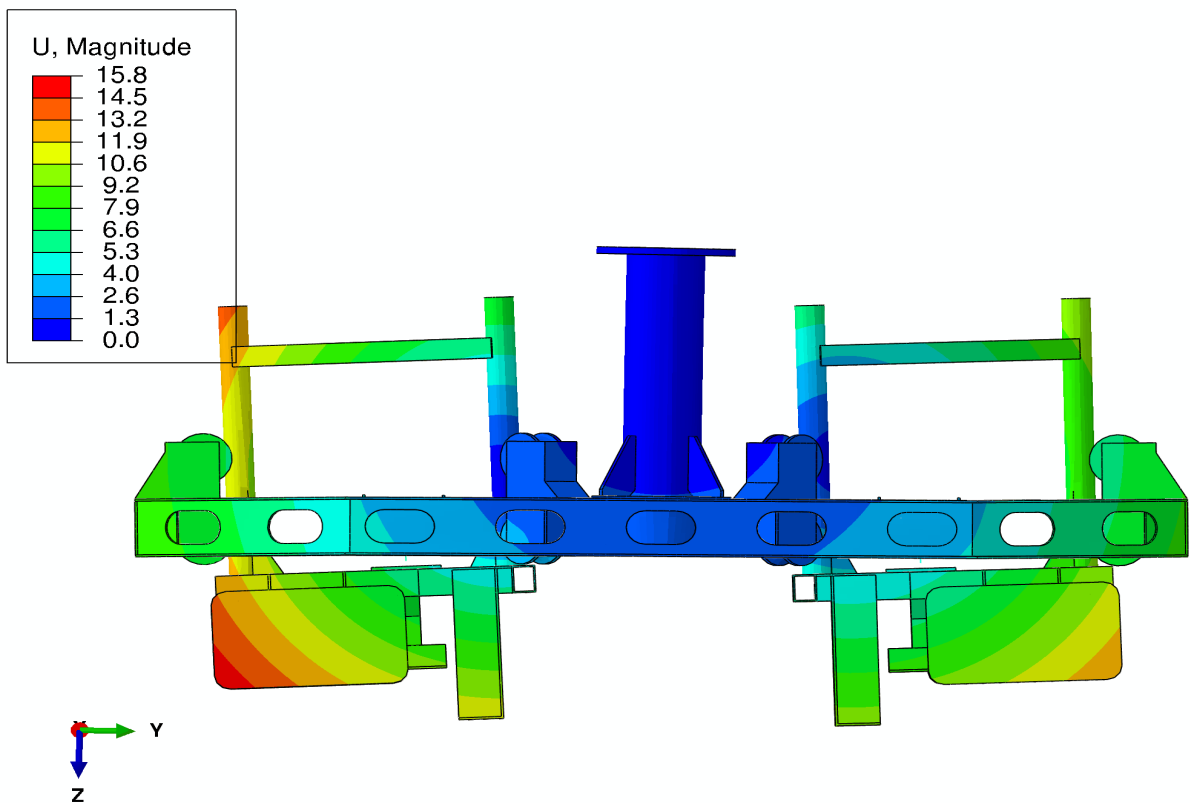
Rys. 6. Model geometryczny zmodyfikowanej ramy nośnej

Proces dyskretyzacji modelu geometrycznego oraz parametry analizy numerycznej zmodyfikowanej ramy głowicy przeprowadzono w sposób identyczny, jak w przypadku modelu ramy przed modyfikacjami.

Przeprowadzone obliczenia wykazały istotną poprawę stopnia wyężenia poszczególnych elementów nośnych ramy głowicy. W rozpatrywanym przypadku poziom naprężeń zredukowanych H-M-H w ramie nośnej nie przekracza założonej granicy plastyczności materiału $R_e=350$ MPa, a jednocześnie otrzymano zdecydowanie bardziej równomierny stopień wyężenia wszystkich elementów nośnych ustroju (rys. 7). Jak widać wykonane w ramie otwory, pomimo znacznych rozmiarów nie powodują dodatkowych spiężeń naprężeń zredukowanych, a jednocześnie w istotny sposób zmniejszają masę ramy nośnej. Maksymalne wartości naprężenia występują w wewnętrznym zespole rolek ramy ruchomej i wynoszą $\sigma=317$ MPa. Taka wartość nie zagraża bezpiecznej pracy urządzenia, lecz stwarza podstawę do rozważenia modyfikacji tego elementu.



Rys. 7. Naprężenia zredukowane H-M-H zmodyfikowanej ramy nośnej



Rys. 8. Przemieszczenia węzłów zmodyfikowanej ramy nośnej

Analizując przemieszczenia węzłowe (rys. 8) można stwierdzić, że maksymalne przemieszczenia wynoszą 15,8 mm. Oznacza to, że wprowadzenie zmian konstrukcyjnych w ramie nośnej zmniejszyło maksymalną wartość przemieszczeń węzłowych w stosunku do oryginalnego modelu. Modyfikacja budowy ramy nośnej przyniosła znaczną korzyść w zmniejszeniu masy głowicy. Przeprowadzona analiza numeryczna pozwoliła wyeliminować ramę zewnętrzną głowicy, której wyteżenie elementów nośnych było na bardzo niskim poziomie. Zaproponowane rozwiązanie spełnia założone cele oraz w istotnym stopniu upraszcza budowę całego urządzenia.

4. Wnioski

Zaprezentowany w pracy sposób modelowania ustrojów nośnych z wykorzystaniem metody elementów skończonych umożliwia przeprowadzenie analizy stopnia odkształcenia i wyteżenia elementów nośnych w warunkach złożonych obciążeń zewnętrznych. Jest to niezwykle istotne w przypadku poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, gdzie na etapie projektowania skomplikowanych maszyn i mechanizmów występuje zbyt wiele nieznanymi parametrów konstrukcyjnych. Znajomość rozkładów naprężenia w elementach nośnych ustroju stanowi zatem zagadnienie o pierwszorzędym znaczeniu, pozwalając na ocenę przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego. Analizy numeryczne umożliwiają również optymalizację parametrów modelu w celu zaprojektowania najkorzystniejszego rozwiązania, pod kątem możliwości przenoszenia określonych obciążeń eksploatacyjnych. Przeprowadzona analiza umożliwiła ocenę zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego, stanowiąc podstawę do wprowadzenia niezbędnych modyfikacji szczegółów konstrukcyjnych w celu otrzymania rozwiązania optymalnego w tym zakresie.

Przeprowadzone metodą elementów skończonych obliczenia numeryczne ramy nośnej głowicy robota paletyzującego wskazały, że można istotnie zwiększyć jego udźwig przy jednoczesnym zmniejszeniu jego masy własnej. W prezentowanym przypadku wyznaczone naprężenia zredukowane wykazały, że wiele elementów nośnych głowicy jest bardzo słabo wyteżona. Modyfikacja ramy nośnej pozwoliła na istotne zmniejszenie masy własnej elementów o 27,5% w stosunku do wariantu podstawowego, zachowując jednocześnie sztywność oraz funkcjonalność ustroju. Jest to dość znaczące pod względem eksploatacyjnym, pozwalając w istotnym stopniu na podniesienie parametrów pracy urządzenia, poprzez zwiększenie możliwości paletyzacji większych ciężarów ładunku. Przygotowany model bryłowy 3D bardzo dobrze oddaje warunki pracy wszystkich elementów i pozwala na dalsze modyfikacje nie tylko ramy nośnej, ale całego urządzenia uniwersalnej głowicy robota paletyzującego. Przeprowadzona analiza umożliwiła ocenę zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego, stanowiąc podstawę do wprowadzenia niezbędnych szczegółowych modyfikacji w celu otrzymania rozwiązania optymalnego w tym zakresie. Zaprezentowana procedura modelowania jest uniwersalna i może być stosowana w innych typach głowic robotów.

Podziękowania: Praca została sfinansowana ze środków z działalności statutowej przyznanych Katedrze Mechaniki Stosowanej Politechniki Lubelskiej „*Grant dla młodych naukowców*” 30/MN/2014.

Spis literatury

1. Abaqus 6.13 analysis user's manual, Dassault Systèmes, 2013.
2. Abdou G., Lee E.: Physical model for robotics palletization. *Computers in Industry* 1991;16(3):255–266.
3. Balasubramanian R.: The pallet loading problem: A survey. *International Journal of Production Economics*, 1992;28(2):217–225.
4. Belforte G., Deboli R., Gay P., Piccarolo P., Ricauda Aimonino D.: Robot Design and Testing for Greenhouse Applications. *Biosystems Engineering* 2006;95(3):309–321.
5. Ehab Ellobody, Ran Feng and Ben Young: Finite Element Analysis and Design of Metal Structures. Butterworth-Heinemann, Waltham, USA, 2014.
6. Ferdynus M.: An energy absorber in the form of a thin-walled column with square cross-section and dimples. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013;3(15):253-258.
7. Friedel Hartmann Casimir Katz: Structural Analysis with Finite Elements. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
8. Guo-Qiang Li and Jin-Jun Li: Advanced: Analysis and Design of Steel Frames. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England, 2007.
9. Guo-Qiang Li, Jin-Jun Li: Advanced Analysis and Design of Steel Frames. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, 2007.
10. Hernan M.: An introduction to Automated Palletizing. Anderson Technical Services, Ohio 2000.
11. Kathryn A. Dowsland, William B. Dowsland: Invited review. Packing problems. *European Journal of Operational Research* 1992;56(1):2–14.
12. Khennane A.: Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB® and Abaqus. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, 2013.
13. Morecki A.: Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów. WNT, Warszawa 1999.
14. Nestor E. and Nava R. (eds): Advanced Mechanics in Robotic Systems. Springer-Verlag London Limited 2011.
15. Olszewski M.: Manipulatory i roboty przemysłowe. WNT, Warszawa 1985.
16. Peter Marti: Theory of structures. Fundamentals framed structures, plates and shells. Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Germany, 2013.
17. Rakowski G., Kacprzyk Z.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
18. Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T.: Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
19. Yaohua He, Yong Wu, Robert de Souza: A global search framework for practical three-dimensional packing with variable carton orientations. *Computers & Operations Research* 2012;39:2395–2414.
20. Yu-Qiu Long, Song Cen and Zhi-Fei Long: Advanced Finite Element Method in Structural Engineering. Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2009.