

Optymalizacja topologiczna ramy nośnej 20-stopowego kontenera biurowego

Krzysztof Konopa¹, Artur Cichanski^{2*}

¹ PESA Bydgoszcz SA, ul. Zygmunta Augusta 11, 85-082 Bydgoszcz, Polska;
e-mail: krzysztof.konopa@pesa.pl

² Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,
Polska; e-mail: artur.cichanski@pbs.edu.pl

* Autor korespondencyjny: e-mail: artur.cichanski@pbs.edu.pl

Streszczenie: Numeryczne analizy konstrukcji prowadzone metodą elementów skończonych stały się standardem dla współcześnie wykonywanych procesów konstruowania maszyn i urządzeń. Coraz częściej weryfikowana jest nie tylko wytrzymałość lub sztywność konstrukcji, ale również w sposób zautomatyzowany przeprowadzany jest dobór cech geometrycznych w toku analiz optymalizacyjnych. W pracy podjęto problematykę optymalizacji topologicznej ramy nośnej 20-stopowego kontenera biurowego na wstępnym etapie doboru cech geometrycznych. Obliczenia prowadzono w środowisku programu ANSYS Workbench. Sformułowano cztery zestawy obciążeń odpowiadające warunkom pracy kontenera. Funkcją celu dla analiz było osiągnięcie minimum masy. Dla analiz przyjęto również ograniczenia definiujące zbiór rozwiązań dobrych. Do tych ograniczeń należało wyłączenie z analiz tych obszarów modelu, w których przykładane były warunki brzegowe oraz narzucono wiązania na maksymalne wymiary przekrojów ramy. Na podstawie przeprowadzonych analiz wskazano numeryczny model ramy uznanej za optymalną ze względu na największy spadek masy. Dla tego wariantu zaproponowano postać geometryczną ramy składającej się ze znormalizowanych kształtowników. Tak uzyskaną ramę poddano weryfikacji obliczeniowej ze względu na wyężenie konstrukcji dla warunków brzegowych wynikających z przyjętych wcześniej zestawów obciążeń. W pracy wykazano skuteczność optymalizacji topologicznej prowadzonej metodą SIMP dla analiz konstrukcji ramowych.

Słowa kluczowe: optymalizacja topologiczna, metoda elementów skończonych, Ansys, konstrukcje ramowe

Topological optimization of the support frame of a 20-foot office container

Krzysztof Konopa¹, Artur Cichański^{2,*}

¹ PESA Bydgoszcz SA, ul. Zygmunta Augusta 11, 85-082 Bydgoszcz, Poland;

e-mail: krzysztof.konopa@pesa.pl

² Bydgoszcz University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: artur.cichanski@pbs.edu.pl

* Correspondent author: e-mail: artur.cichanski@pbs.edu.pl

Summary: Numerical structural analysis using the finite element method has become standard in modern machine and equipment design processes. Increasingly, not only the strength or stiffness of the structure is verified, but also the selection of geometric features in optimisation analyses is performed in an automated manner. The paper deals with the problem of topological optimisation of the supporting frame of a 20-foot office container at the initial stage of geometric feature selection. The computations were performed in the ANSYS Workbench environment. Four load cases were formulated according to the operating conditions of the container. The objective function for the analyses was to achieve a minimum mass. Constraints defining the set of good solutions were also adopted for the analyses. These constraints included excluding from the analyses those areas of the model where boundary conditions were applied and limiting the maximum dimensions of the frame cross sections. On the basis of the analyses, a numerical model of the frame that was considered optimal in terms of maximum weight loss was indicated. For this variant, a geometric shape of a frame composed of standardised sections was proposed. The frame obtained in this way was subjected to a computational verification in terms of structural strength for the boundary conditions resulting from the previously assumed load cases. The work demonstrates the effectiveness of topological optimisation using the SIMP method for the analysis of frame structures.

Key words: topological optimization, finite element method, Ansys, frame structures

1. Wstęp

Nowoczesne kontenery biurowe produkowane są jako zunifikowane, samodzielne i samowystarczalne budynki modułowe, których mobilność jest dodatkową zaletą w porównaniu z budynkami stacjonarnymi. W zależności od przeznaczenia mogą być wykorzystane jako kontenery budowlane lub kontenery socjalne, wyposażone w instalację elektryczną i grzewczą. Zaletą ich budowy jest elastyczność w rozmieszczeniu okien i drzwi. Konstrukcja kontenera biurowego bazująca na ramie nośnej pozwala na jego szybkie posadowienie bez konieczności wykonania fundamentu [9]. Całoroczne kontenery biurowe produkowane są z wysokiej jakości blach ocynkowanych. Wykończenie zewnętrzne wykonane jest najczęściej z blachy mikroprofilowanej, zaś wewnętrzne z blachy gładkiej [10]. Zastosowanie do izolacji ścian styropianu, poliuretanu lub wełny mineralnej pozwala uzyskać różne wartości współczynnika przenikania ciepła [10].

Dobór cech geometrycznych elementu konstrukcyjnego prowadzi do podjęcia decyzji o sposobie rozmieszczenia materiału, tak aby obiekt spełniał wymagania funkcjonalne dla minimalnej masy własnej. We współczesnych systemach CAD-CAE powszechnie implementowane są moduły do optymalizacji parametrycznej [3] jak i optymalizacji topologicznej [4]. Optymalizacja topologiczna dostarcza konstruktorowi informacji o optymalnym sposobie rozmieszczenia materiału w wskazanym obszarze dla zadanych warunków brzegowych [4].

Optymalizacja topologiczna dostępna w we współczesnych w systemach CAD wykonywana jest metodą Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) [2]. Zadaniem tej metody jest eliminacja materiału z elementów leżących w obszarze projektowym, dla których generowany w trakcie obliczeń, zastępczy materiał ma stosunkowo niewielką gęstość. Moduł do optymalizacji topologicznej dostępny w środowisku Autodesk Inventor jako kryterium optymalizacji przyjmuje utrzymanie maksymalnej sztywności przy jednoczesnej redukcji masy [8]. Moduł dostępny w środowisku SolidWorks dodatkowo pozwala na przyjęcie jako kryterium minimalizację przemieszczenia [7]. Bardziej zaawansowane analizy optymalizacji topologicznej można prowadzić w środowisku Ansys Workbench [1]. Środowisko to dysponuje nie tylko metodą SIMP, ale również metodą Level Set Based, w której zmieniana jest nie tylko gęstość elementów tworzących dany obiekt, lecz także jego kontur. Inna dostępna w Ansys Workbench metoda Shape Optimization wykonuje optymalizację kształtu przez zmianę położenia węzłów siatki podziału bez zmiany gęstości elementów.

W pracy przedstawiono optymalizację topologiczną konstrukcji ramy nośnej kontenera na wstępnym etapie doboru cech geometrycznych. Do celów analizy sformułowano zestawy obciążeń odpowiadające warunkom pracy kontenera. Przyjęto również ograniczenia konstrukcyjne. Na podstawie przeprowadzonych analiz wskazano numeryczny model ramy uznanej za optymalną. Dla tego modelu zaproponowano postać geometryczną ramy składającej się ze znormalizowanych kształtowników. Tak uzyskaną ramę poddano weryfikacji obliczeniowej ze względu na wyężenie konstrukcji.

2. Metoda badawcza

2.1. Obiekt badań

Obiektem badań jest rama nośna kontenera biurowego. Do analiz przyjęto, że konstrukcja tej ramy będzie spawana z zamkniętych profili stalowych. Maksymalna szerokość profilu mierzona w kierunku normalnym w płaszczyźnie ściany wynosi 40 mm. Wymiary gabarytowe kontenera powinny odpowiadać wymiarom znormalizowanego kontenera 20'DV (PN-ISO 668) i wynoszą:

- długość – 6058 mm,
- szerokość – 2438 mm,
- wysokość – 2591mm [5].

Na potrzeby analiz założono masy gotowego kontenera uwzględniające nie tylko masę własną ramy, lecz również masy ścian wraz z izolacją oraz wyposażenie wewnętrzne:

- $m_1 = 2000$ kg, zakładana masa kontenera pustego,
- $m_2 = 3000$ kg, zakładana masa kontenera z wyposażeniem,
- $m_3 = 4000$ kg, zakładana masa maksymalna kontenera.

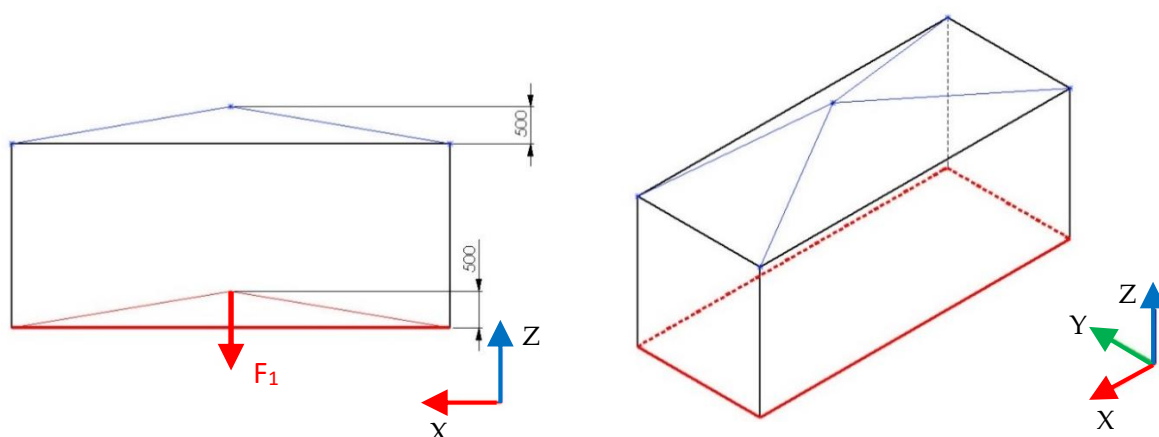
Przyjęto, że rama nośna wykonana będzie ze stali S335JR dla której minimalna granica plastyczności $R_e = 355$ MPa a wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 510$ MPa.

2.2. Warunki brzegowe i ograniczenia dla analiz

Analizy prowadzono w środowisku programu Ansys Workbench 2023R2. Wstępną powłokową postać geometryczną przygotowano w module SpaceClaim. Do budowy modelu wykorzystano 4-węzłowe elementy powłokowe *Quad* o rozmiarze charakterystycznym 40 mm. Siatka podziału składa się z 44034 elementów i 44033 węzłów. W analizach uwzględniono cztery przypadki obciążeń odpowiadające warunkom pracy kontenera. Do analiz wprowadzono ograniczenie *Manufacturing Constrain* definiujące maksymalną wielkość członu modelu o rozmiarze 330 mm. Analizy przeprowadzono dla trzech wariantów nominalnej redukcji masy do 90%, 95% i 97% masy początkowej.

Przypadek obciążenia 1

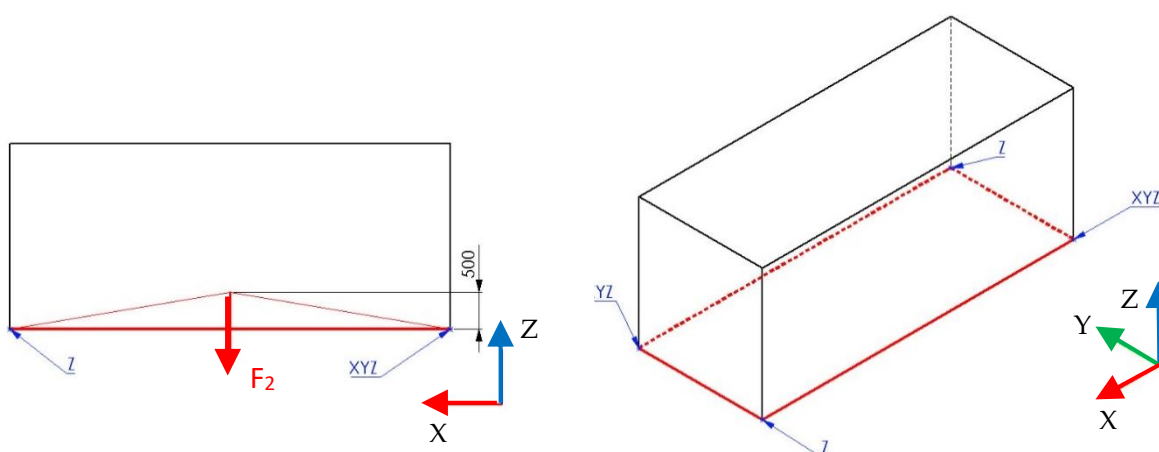
Pierwszy przypadek odwzorowuje podnoszenie kontenera z wyposażeniem. Model utwierdzony jest za pomocą warunku *Remote Displacement* wiążącego cztery górne narożniki z punktem charakterystycznym położonym 500 mm nad środkiem dachu kontenera. W punkcie tym odebrane zostały wszystkie translacyjne jak i rotacyjne stopnie swobody. Tak zdefiniowane utwierdzenie modeluje podnoszenie kontenera za cięgna łączące cztery górne narożniki z jednym hakiem leżącym pośrodku dachu. Obciążenie pochodzące od masy kontenera z wyposażeniem $F_1 = m_2 \cdot g$ zostało przyłożone na podstawie warunku *Remote Force* definiowanego w oparciu o krawędzie podłogi. Punkt charakterystyczny tego warunku leży w zakładanym środku ciężkości kontenera. Schemat obciążenia dla przypadku 1 przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przypadek obciążenia 1. Podnoszenie za pomocą haka i cięgien
Fig. 1. Load case 1. Lifting with hook and tie rods

Przypadek obciążenia 2

Drugi przypadek odwzorowuje maksymalne obciążenie wywołane nie tylko przez umieszczenie w kontenerze wyposażenia, ale również przez ponadnormalną ilość ludzi i sprzętu. Obciążenie $F_2 = m_3 \cdot g$ zostało przyłożone na podstawie warunku *Remote Force* definiowanego w oparciu o krawędzie podłogi. Punkt charakterystyczny pokrywał się z punktem przyjętym dla *Przypadku obciążenia 1*. Model został podparty w dolnych narożnikach. W dwóch przeciwnych narożnikach odebrano translacyjne stopnie swobody w osi OZ. W jednym narożniku odebrano wszystkie stopnie translacyjne swobody, a w przeciwnym zablokowano możliwość przemieszczenia w osiach OY i OZ. Schemat obciążenia dla przypadku 2 przedstawiono na rys. 2.

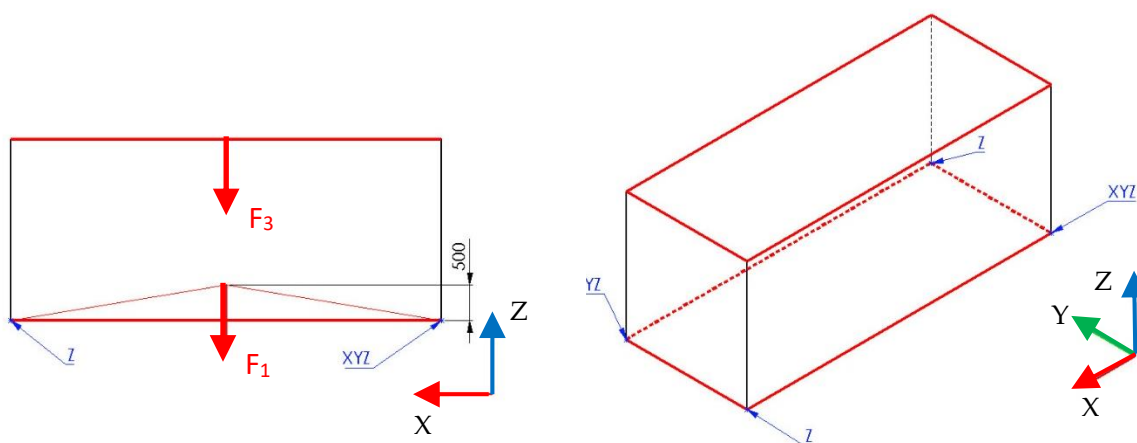


Rys. 2. Przypadek obciążenia 2. Obciążenie ekstremalne ramy kontenera
Fig. 2. Load case 2. Extreme load on the container frame

Przypadek obciążenia 3

Trzeci przypadek obciążenia odwzorowuje obciążenie dachu kontenera masą zalegającego śniegu. Dla najbardziej obciążonego, nizinnego obszaru Polski obciążenie

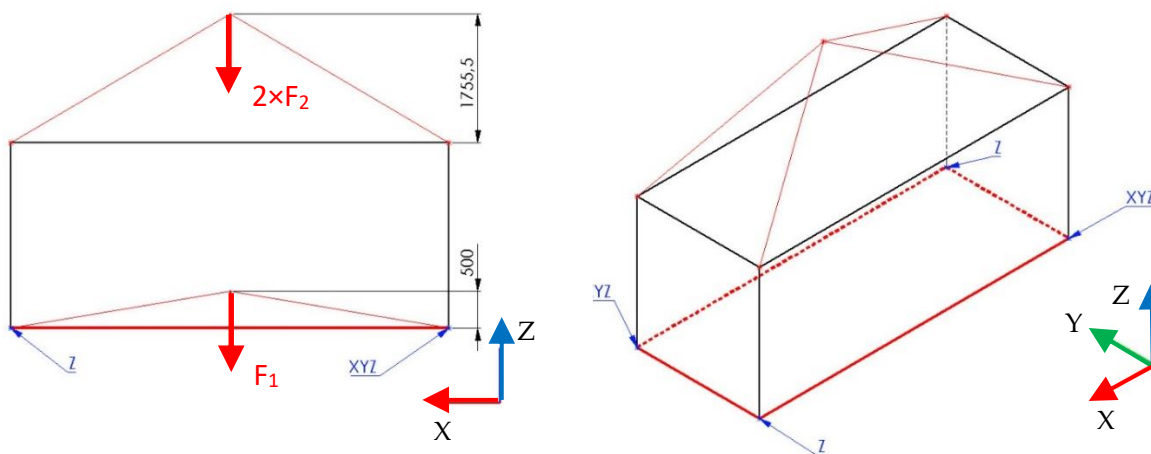
żenie od śniegu wynosi $1,6 \text{ kN/m}^2$ (strefa 4 według PN-EN 1991-1-3). Dla analizowanego kontenera wyznaczoną siłą pochodzącą od obciążenia śniegiem $F_3 = 23\,631 \text{ N}$ przyłożono do krawędzi dachu. Dodatkowo obciążono ramę siłą pochodzącą od masy kontenera z wyposażeniem jak w *Przypadku obciążenia 1*. Analizowana rama była podparta jak w *Przypadku obciążenia 2*. Schemat obciążenia dla przypadku 3 przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Przypadek obciążenia 3. Obciążenie dachu kontenera zalegającym śniegiem
Fig. 3. Load case 3. Load on container roof with snow

Przypadek obciążenia 4

Czwarty przypadek obciążenia odwzorowuje obciążenie kontenera zestawem dwóch innych kontenerów ustawionych na nim piętrowo. Siłę wypadkową pochodzącą od kontenerów leżących na dachu kontenera przyłożono w ich wspólnym środku ciężkości i powiązano z narożnikami górnej powierzchni modelu obliczeniowego. Dodatkowo obciążono ramę siłą pochodzącą od masy analizowanego kontenera z wyposażeniem jak w *Przypadku obciążenia 1*. Analizowana rama była podparta jak w *Przypadku obciążenia 2*. Schemat obciążenia dla przypadku 4 przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przypadek obciążenia 4. Obciążenie kontenerami ustawionymi piętrowo
Fig. 4. Load case 4. Load with containers stacked on top

3. Wyniki

3.1. Wyniki analiz optymalizacyjnych

Numeryczny model ramy wyznaczony w toku analiz optymalizacyjnych dla zadanej redukcji do 90% masy początkowej przedstawiono na rys. 5. Dla modelu tego uzyskano redukcję do 85% masy początkowej po 41. iteracji.



Rys. 5. Numeryczny model ramy zoptymalizowanej do 85% masy początkowej

Fig. 5. Numerical model of the frame optimized to 85% of the initial weight

Numeryczny model ramy wyznaczony w toku analiz optymalizacyjnych dla zadanej redukcji do 95% masy początkowej przedstawiono na rys. 6. Dla modelu tego uzyskano redukcję do 90% masy początkowej po 114. iteracji.



Rys. 6. Numeryczny model ramy zoptymalizowanej do 90% masy początkowej

Fig. 6. Numerical model of the frame optimized to 90% of the initial weight

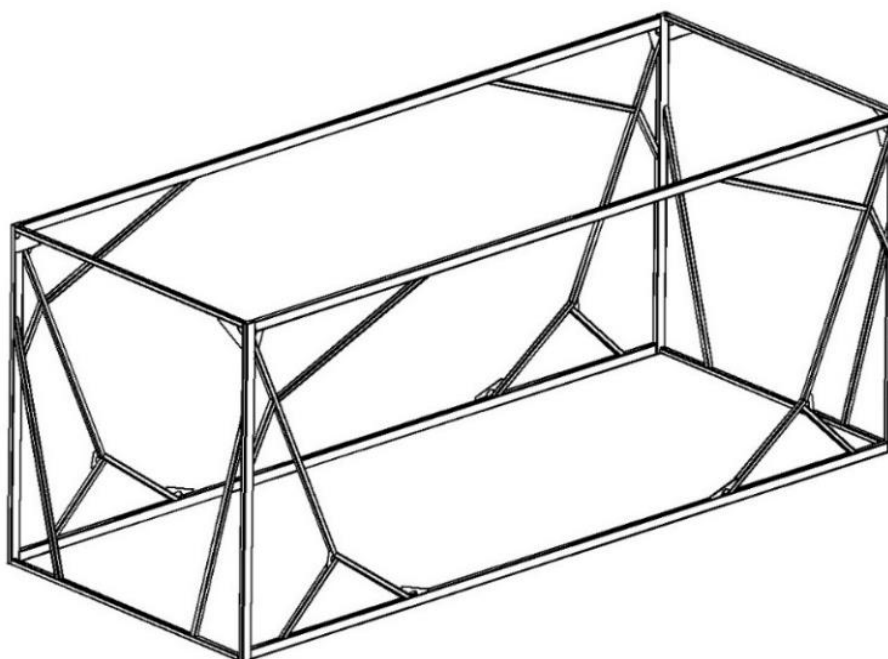
Numeryczny model ramy wyznaczony w toku analiz optymalizacyjnych dla zadanej redukcji do 97% masy początkowej przedstawiono na rys. 7. Dla modelu tego uzyskano redukcję do 92,5% masy początkowej po 126. iteracjach.



Rys. 7. Numeryczny model ramy zoptymalizowanej do 92,5% masy początkowej
Fig. 7. Numerical model of the frame optimized to 92,5% of the initial weight

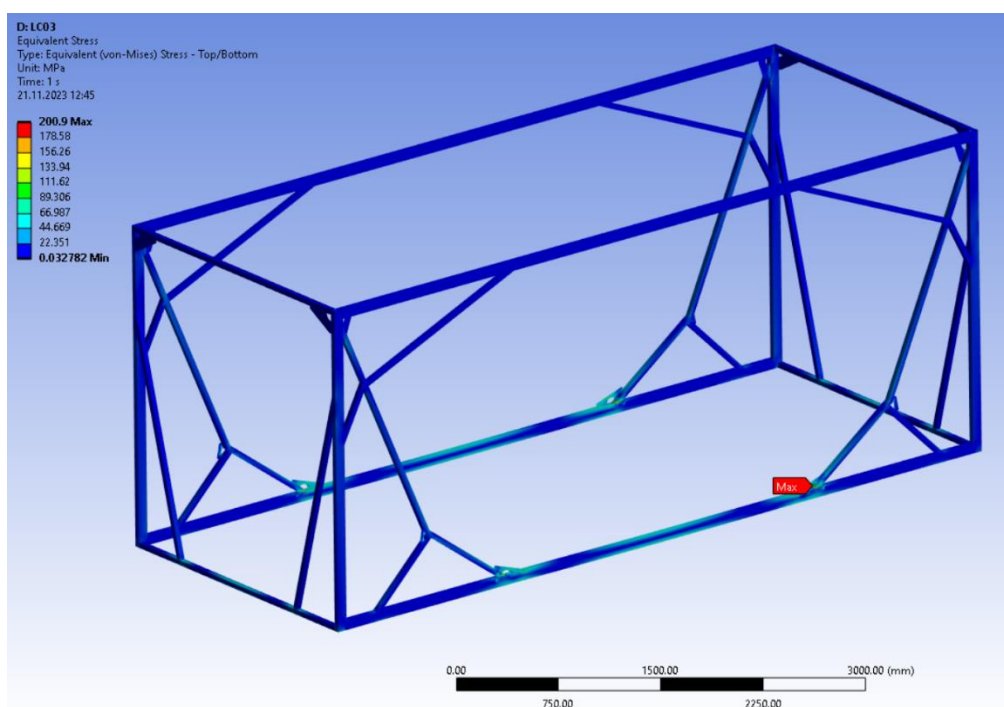
3.2. Wyniki analiz strukturalnych

Do dalszych prac przyjęto wariant modelu ramy zoptymalizowanej do 92,5% masy początkowej. Dla tego modelu utworzono postać konstrukcyjną rozważanej ramy. Tak utworzona rama składa się z kształtowników RHS 80x40x3 i RHS 40x40x3 według EN 10210-2.



Rys. 8. Postać geometryczna ramy nośnej kontenera biurowego
Fig. 8. The geometric shape of the frame of an office container

Najbardziej wyężone miejsca ramy zostały wzmocnione blachami węzłowymi o grubości 3 mm. Masa tak uzyskanej konstrukcji wynosi 336,81 kg. Wstępnie dobraną postać geometryczną poddano weryfikacji ze względu na występujący w niej stan naprężenia. Dla przyjętej postaci konstrukcyjnej stworzono powłokowy model dyskretny. Rozmiar elementu ustalono na 20 mm, zapewniając utworzenie co najmniej dwóch elementów na szerokości półki kształtowników przyjętych dla konstrukcji ramy. Model dyskretny składa się z 36020 elementów oraz 36572 węzłów. Warunki brzegowe odpowiadały czterem przypadkom obciążeń przyjętych dla analiz optymalizacyjnych. Największe wartości maksymalnych naprężeń w ramie uzyskano dla *Przypadku obciążenia 3* (rys. 9).



Rys. 9. Rozkład naprężeń zredukowanych wyznaczonych dla *Przypadku obciążenia 3*
 Fig. 9. Distribution of reduced stresses determined for Load Case 3

Wyniki analiz strukturalnych wyznaczone dla poszczególnych przypadków obciążeń były podobne zarówno w zakresie rozmieszczenia naprężeń zredukowanych w prętach, jak i występowania wartości ekstremalnych naprężeń. Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych wyznaczone dla poszczególnych przypadków obciążeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych wyznaczone dla poszczególnych przypadków obciążeń

Table 1. Maximum values of reduced stresses determined for individual load cases

Obciążenia	σ_{EQV}^{max} [MPa]
Przypadek obciążenia 1	176,5 MPa
Przypadek obciążenia 2	179,0 MPa
Przypadek obciążenia 3	200,9 MPa
Przypadek obciążenia 4	168,6 MPa

4. Analiza wyników

Wyniki analiz optymalizacyjnych przedstawiono na rys. 5-7. Dla każdego z rozważanych wariantów uzyskano modele o znacznie zredukowanej masie. W każdym z trzech wariantów zrealizowane obniżenie masy było 2,5% do 5% mniejsze od zakładanego. Uzyskanie coraz to większej redukcji masy wymagało przeprowadzenia większej liczby iteracji zadania numerycznego. Dla osiągnięcia redukcji 85% masy potrzebnych było 41 iteracji. Redukcja do 90% masy wymagała 114 iteracji, była więc ponad dwukrotnie większa. Różnice pomiędzy zakładaną a zrealizowaną redukcją masy częściowo tłumaczy uwzględnienie w wynikach odłączonych fragmentów modelu nie przenoszących obciążenia. Wyniki analiz wytrzymałościowych zestawiono w tabeli 1. Wyznaczone maksymalne wartości naprężeń zredukowanych mieszczą się poniżej granicy plastyczności.

5. Wnioski

Wykonanie optymalizacji topologicznej w środowisku programu Ansys Workbench pozwoliło na przygotowanie konstrukcji ramy nośnej kontenera biurowego charakteryzującej się niską masą. Przyjęta konstrukcja ramy charakteryzuje się wytrzymałością odpowiednią do przenoszonego obciążenia.

Optymalizacja topologiczna prowadzona metodą SIMP ma zastosowanie przede wszystkim do analiz bryłowych i cienkościennych elementów konstrukcyjnych. W pracy wykazano skuteczność tej metody do optymalizacji topologicznej elementów konstrukcyjnych, które na etapie doboru cech konstrukcyjnych mają charakter ustrojów ramowych.

Bibliografia

- [1] Aquib, B.Y., Tasfia, M.B.K., Sajjid, H.A., "Structural Analysis and Topology Optimization of an Aircraft bracket under Multiaxial Loading", Proceedings of The 2nd International Conference on Mechanical Engineering and Applied Sciences, 2022.
- [2] Cazacu, R., Grama, L., "Overview of structural topology optimization methods for plane and solid structures", Annals of the University of Oradea, Fascicle of Management and Technological Engineering Bd. 23(3), (2014), 1583–1591.
- [3] Eschenauer, H.A., Olhoff, N., "Topology optimization of continuum structures: A review", Applied Mechanics Reviews, Vol. 54(4), (2001), 331–390.
- [4] Kutylowski, R., „Optymalizacja topologii kontinuum materialnego”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- [5] PN-ISO 668:1999 – Kontenery ładunkowe serii 1 – Klasyfikacja, wymiary i maksymalne masy brutto.
- [6] Stadnicki, J., „Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2024.
- [7] Struz, J., Hruzik, L., Klapetek, L., Trochta, M., "Comparative analysis of different softwares in terms of parameters optimized by topological optimization", MM Science Journal, March 2023, 6346–6353.
- [8] Teo, J.W.C, Khan, S.F., "Topology optimization of mandible fracture plate", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 670(012049), (2019).
- [9] weldon.pl, <https://weldon.pl/kontenery/kontenery-biurowe/> (dostęp: 21.11.2023).
- [10] www.anga.pl, <https://www.anga.pl/oferta-sprzedazy/kontenery-biurowe> (dostęp: 21.11.2023).