



Analiza rozkładu naprężeń oraz przemieszczeń drabiny rozstawnej

A. Podolska^a, K. Studnik^a, A. Śliwa^b

^a Studenci Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: angelika.podolska@gmail.com, krzysztof.studnik@gmail.com

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę rozkładu naprężeń i przemieszczeń powstałych w konstrukcji drabiny rozstawnej pod obciążeniem z zastosowaniem oprogramowania SolidWorks. Określono obszary o największej wartości naprężeń oraz maksymalne przemieszczenie jakie ma miejsce podczas użytkowania.

Abstract: The paper presents the analysis of the stress and displacement distribution in step ladder under different load in SolidWorks software. Places with the higher stress and displacement was determined.

Słowa kluczowe: drabina, rozkład naprężeń, przemieszczenia, MES

1. WPROWADZENIE

Ciągły rozwój w wielu dziedzinach techniki związany jest z koniecznością pozyskania nowych materiałów. Aktualny stan wiedzy pozwala na świadome projektowanie własności materiałów przy uwzględnieniu indywidualnych wymagań stawianych konstrukcji. Znaczny wzrost prędkości rozwoju dziedziny takiej jak inżynieria materiałowa został spowodowany przez dynamiczny wzrost mocy obliczeniowej komputerów, co z jednej strony pozwala na skrócenie czasu obliczeń i zwiększenie ich dokładności, a z drugiej umożliwia analizowanie zjawisk i modeli wcześniej niepoliczalnych [1].

Intensywny rozwój technik komputerowych sprawił, że metoda elementów skończonych (MES) to obecnie jedna z istotniejszych metod numerycznej analizy konstrukcji. Metoda ta stosowana jest w wielu obszarach inżynierii i matematyki stosowanej. Popularność metody elementów skończonych wynika z łatwości, z jaką można ją wykorzystać do symulacji różnorodnych problemów, w których ma się styczność z bardzo skomplikowaną geometrią, złożonym stanem obciążenia, różnymi warunkami brzegowymi oraz z różnorodnymi materiałami. W takim przypadku ciężko uzyskać rozwiązanie analityczne, a wykorzystanie komputera i idei MES, która opiera się na budowaniu złożonych obiektów z prostych elementów lub dzieleniu tych obiektów na małe określone elementy znacznie ułatwia uzyskanie wyniku. Łatwość zintegrowania oprogramowania MES z komputerowym wspomaganie oraz

szereg zalet, w tym możliwość uzyskania optymalnych rozwiązań spowodowały powszechne zastosowanie MES [2÷4].

Celem niniejszej pracy było przedstawienie możliwości zastosowania komputerowego wspomaganie w inżynierii materiałowej poprzez analizę naprężeń przy pomocy metody elementów skończonych w konstrukcji drabiny rozstawnej 5-stopniowej. Przedstawiono podstawy teoretyczne dotyczące metody elementów skończonych, a następnie wykonano symulacje przenoszenia obciążeń modelu drabiny uzyskując w wyniku rozkład naprężeń w poszczególnych elementach konstrukcji.

2. METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Metoda elementów skończonych zaliczana jest do rodziny programów CAE (ang. *Computer Aided Engineering*). MES to metoda numeryczna, która sprowadza rozwiązywanie równań różniczkowych do działań na macierzach, a obszar zastosowań poszerzać się będzie wraz z rozwojem programów komputerowych. Podstawowa cecha tej metody to podział badanego obiektu na skończoną liczbę podobszarów, zwanych elementami skończonymi. Elementy te połączone są ze sobą w punktach zwanych węzłami, a taki podział obiektu nazywa się dyskretyzacją. Rozmiary i liczba elementów ograniczane są możliwościami obliczeniowymi komputera, ponieważ liczba równań jest proporcjonalna do liczby węzłów i stopni swobody istniejących w każdym z nich [3,5].

Programy komputerowe wykorzystujące metodę elementów skończonych składają się z trzech głównych części [3,6]:

- preprocesor – obejmuje on zdefiniowanie problemu i przygotowanie danych do:
 - zdefiniowania kluczowych elementów (punkty, linie, powierzchnie, objętości),
 - zdefiniowanie rodzaju elementu, cech geometrycznych i materiałowych,
 - podział modelu na elementy;
- procesor – obejmuje on wykonanie obliczeń. Ten etap pracy z programem nie wymaga żadnej interakcji ze strony użytkownika, za pomocą komunikatu przekazana jest informacja, że obliczenia się zakończyły i wyniki są gotowe do obróbki w postprocesorze;
- postprocesor – dalsza obróbka danych i oglądanie wyników:
 - przemieszczenia oraz wartości siły i momentów w poszczególnych węzłach,
 - wykresy przedstawiające odkształcenia i naprężenia panujące w modelu.

Metoda elementów skończonych wykorzystywana jest przez wiele gałęzi współczesnego przemysłu, począwszy od przemysłu motoryzacyjnego, maszynowego, lotniczego a skończywszy na elektrotechnicznym. MES wykorzystuje się także przeprowadzając badania w dziedzinach takich jak inżynieria materiałowa, mechanika, mechatronika czy medycyna. Służy także do sprawdzenia wykonanych obliczeń analitycznych, mających na celu sprawdzenie poprawności zaprojektowania konstrukcji i doboru odpowiedniego materiału. Pozwala to na pominięcie badań na gotowym, nieraz kosztownym elemencie, umożliwiając naniesienie w razie konieczności niezbędnych poprawek do projektu [7÷10].

3. OPROGRAMOWANIE MES

Jedne z najbardziej znanych systemów MES to programy takie jak: ABAQUS, ADINA, ANSYS, LS-DYNA, MARC, SOLIDWORKS czy NASTRAN. Są to ciekawe narzędzia,

nie wymagające wielkiej wprawy w obsłudze, a także ogromnej wiedzy komputerowej, aby można ich używać do zaawansowanych czynności. Wśród wymienionych wyżej programów ANSYS to program zaliczany do czołówki, ze względu na wiele zalet, które posiada. Pozytywne cechy to między innymi: bardzo dobra pomoc i dokumentacja, duże możliwości wyboru cech obiektów oraz prezentacji wyników a także bogata biblioteka elementów skończonych (ponad 200). Ze względu na ilość zagadnień z możliwością zastosowania programu ANSYS, jest on jednym z najobszerniejszych pakietów programów dla obliczeń MES. W aktualnej postaci program ten wykorzystuje elementy skończone zawierające opis fizycznych zjawisk takich, jak: akustyka, elektryczność, magnetyzm, przepływ ciepła, przepływ cieczy i gazów oraz wytrzymałość [7÷9].

Programy MES umożliwiają dokonywanie obliczeń zagadnień zmieniających się w czasie jak i stacjonarnych. Należy zauważyć, że bardzo duża rola w obliczeniach inżynierskich i pracach badawczych przywiązywana jest do powtarzalności i dokładności wyników. W swojej klasie rozbudowanych pakietów MES, oprogramowanie ANSYS posiada odpowiednie certyfikaty, włączając w to normę ISO 9001. Według zapewnień Firma ANSYS przed dopuszczeniem do użytku nowej wersji programu, poddaje ją minimum 20 tys. testów, porównując wyniki obliczeń z wynikami analitycznymi, bądź z pomiarami rzeczywistego zjawiska [5, 7÷9].

4. SYMULACJA KOMPUTEROWA

Symulację komputerową obciążeń wykonano w programie SolidWorks. Model geometryczny drabiny rozstawnej 5-stopniowej utworzono zgodnie z wymiarami rzeczywistymi. Elementy konstrukcyjne drabiny zaprojektowano z blachy aluminiowej o grubości 2 mm. Nominalna wysokość drabiny wynosi 1597,48 mm, a jej rozstaw 900 mm. Poszczególne stopnie wstawiono w odległości 216,13 mm względem siebie, a najwyższy stopień położony jest na wysokości 1004,39 mm. Model drabiny przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Model drabiny rozstawnej 5-stopniowej
Figure 1. Model of 5-step ladder

Do wyznaczenia rozkładu naprężeń w konstrukcji drabiny zastosowano oprogramowanie SolidWorks, które wykorzystuje metodę elementów skończonych. Podczas badania zastosowano liniowy izotropowy model zachowania się materiałów. Materiał konstrukcji określono jako stop aluminium 6063-T5 (wg norm ISO: AlMg0,7Si), wykorzystując bazę materiałów oprogramowania SolidWorks. Stop ten charakteryzuje się średnią wytrzymałością na rozciąganie i wytrzymałością zmęczeniową, ale ze względu na bardzo dobrą tłoczność jest powszechnie stosowany do produkcji profili aluminiowych. Skład chemiczny stopu 6063-T5 przedstawiono w tabelicy 1, a jego własności mechaniczne w tabelicy 2.

Tablica 1. Skład chemiczny stopu 6063-T5

Table 1. Chemical composition of 6063-T5 alloy

Pierwiastek	Mg	Si	Fe	Cr	Mn	Ti	Cu	Zn	Inne	Al
Stężenie, %	0,45÷0,9	0,2÷0,6	<0,35	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,15	reszta

Tablica 2. Własności mechaniczne stopu 6063-T5

Table 2. Mechanical properties of 6063-T5 alloy

Własności mechaniczne 6063-T5	
Twardość HV	70
Wytrzymałość na rozciąganie	186 MPa
Granica plastyczności	145 MPa
Wydłużenie	12%
Moduł Younga	68,9 GPa
Współczynnik Poissona	0,33
Wytrzymałość zmęczeniowa	68,9 MPa

W celu wykonania symulacji przyjęto następujące warunki brzegowe:

- drabinę umocowano na stałe na dolnych powierzchniach,
- na najwyższy stopień przyłożono siłę pionowo w dół o wartości 981 N, co odpowiada obciążeniu masą 100 kg,
- wykorzystano własności stopu 6063-T5 z bazy materiałów oprogramowania SolidWorks.

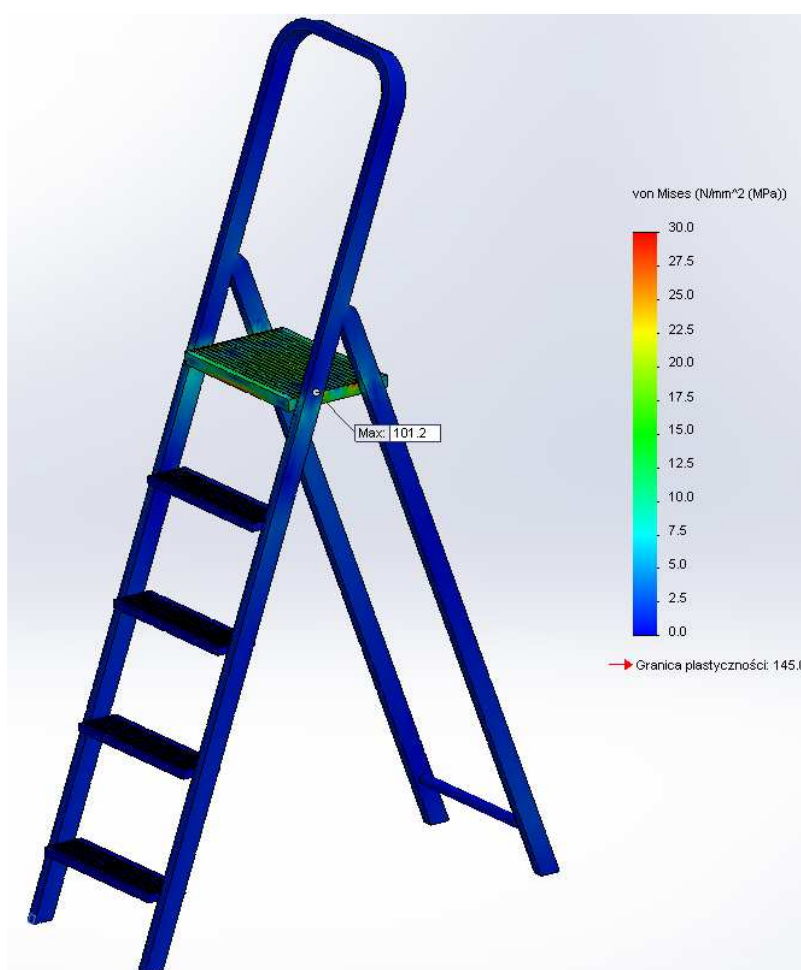
Optymalny rozmiar elementu siatki ustalono na 13,634 mm. Zbyt duży rozmiar elementu mógłby obniżyć dokładność symulacji, z kolei zbyt duża liczba elementów znacznie wpłynęłaby na czas trwania symulacji ze względu na ograniczenia systemu komputerowego. Model składał się w sumie z 69 470 elementów i 132 294 węzłów. Utworzoną siatkę przedstawiono na rysunku 2.

5. ANALIZA WYNIKÓW

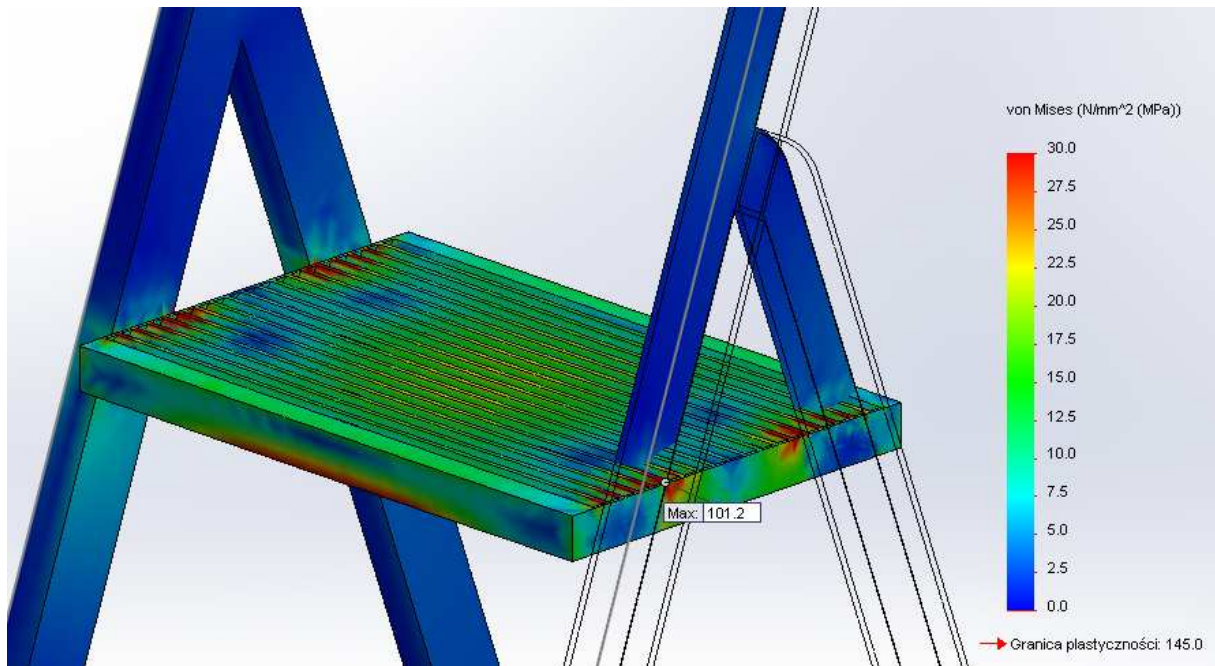
Analizę naprężeń wykonano na podstawie wykresu naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa. Po obciążeniu konstrukcji siłą 981 N otrzymano wykres naprężeń przedstawiony na rysunkach 3÷5. Wartości naprężeń przedstawiono w MPa (N/mm²) w różnych skalach w celu lepszego zobrazowania rozkładu naprężeń. Na podstawie otrzymanych wykresów można stwierdzić, że większość naprężeń występuje w obszarze najwyższego stopnia, a rama konstrukcji pozostaje nienaruszona.



Rysunek 2. Modelu drabiny rozstawnej z nałożoną siatką elementów skończonych
 Figure 2. Mesh created for step ladder model

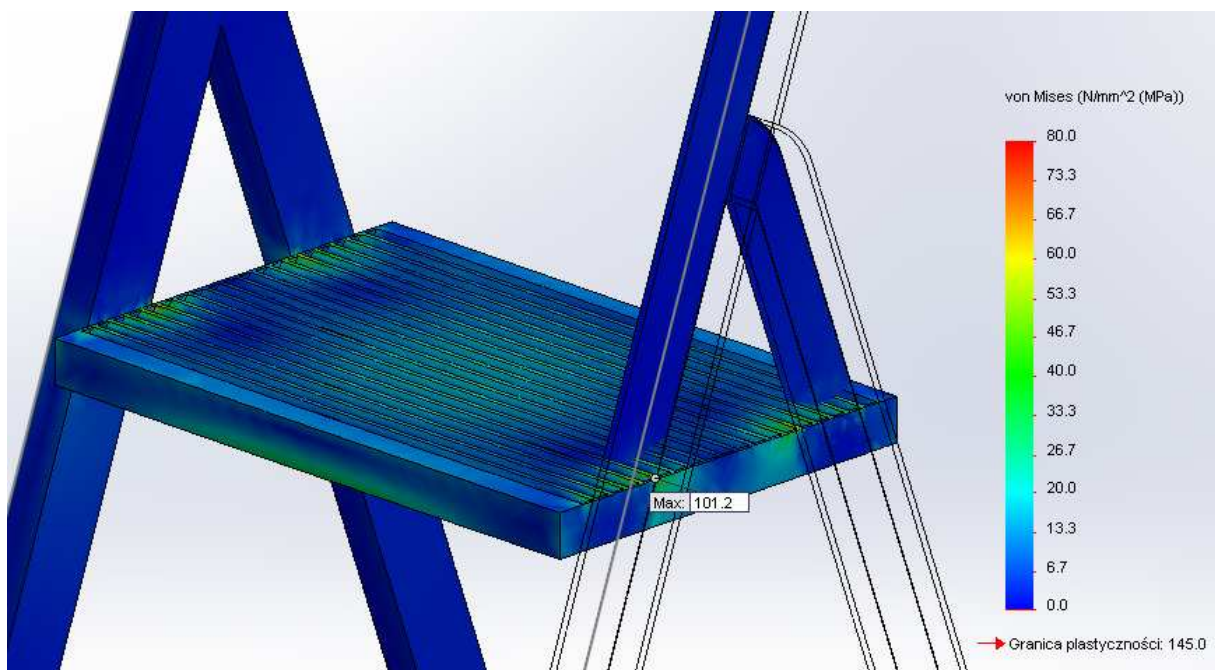


Rysunek 3. Wykres rozkładu naprężeń zredukowanych w modelu drabiny rozstawnej
 Figure 3. Stress distribution in step ladder model



Rysunek 4. Wykres rozkładu naprężeń zredukowanych w modelu drabiny rozstawnej – widok najwyższego stopnia, skala 0÷30 MPa

Figure 4. Stress distribution in step ladder model – highest step, range 0÷30 MPa

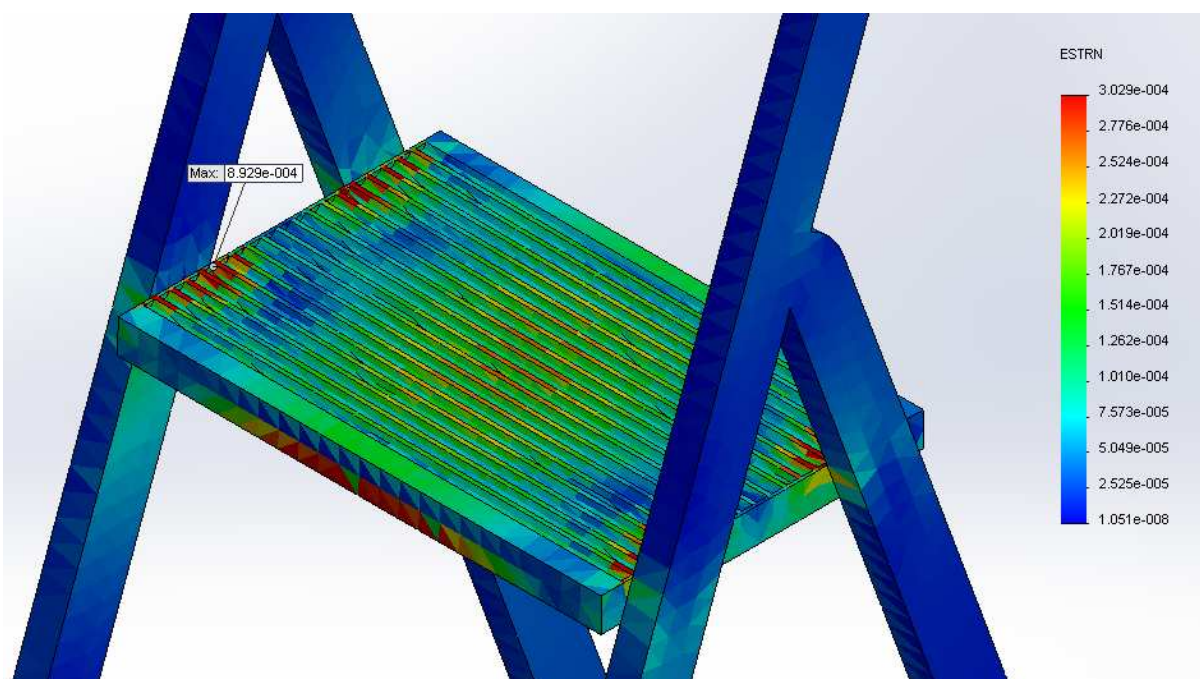


Rysunek 5. Wykres rozkładu naprężeń zredukowanych w modelu drabiny rozstawnej – widok najwyższego stopnia, skala 0÷80 MPa

Figure 5. Stress distribution in step ladder model – highest step, range 0÷80 MPa

W wyniku działania na powierzchnię stopnia siły o wartości 981 N skierowanej pionowo w dół najwyższe naprężenia wystąpiły w miejscach połączenia stopnia z ramą konstrukcji oraz na środku ścian czołowych stopnia, jednak w większości nie przekraczają one 55 MPa. Są to najbardziej wrażliwe obszary konstrukcji drabiny w takich warunkach obciążenia i w nich występuje największe ryzyko jej zniszczenia. Z kolei w środkowej części stopnia naprężenia nie przekroczyły 25 MPa. Maksymalne naprężenie wystąpiło na małej powierzchni w miejscu łączenia stopnia z ramą i jego wartość wyniosła 101,2 MPa. Badaniu poddano konstrukcję drabiny wykonaną ze stopu aluminium 6063-T5, który charakteryzuje się granicą plastyczności na poziomie 145 MPa, więc jednorazowe obciążenie siłą o wartości 981 N nie spowodowałoby jej uszkodzenia, jednak przy cyklicznym obciążeniu wytrzymałość tego materiału wynosi tylko 68,9 MPa, co przy takich naprężeniach spowodowałoby powstawanie pęknięć zmęczeniowych.

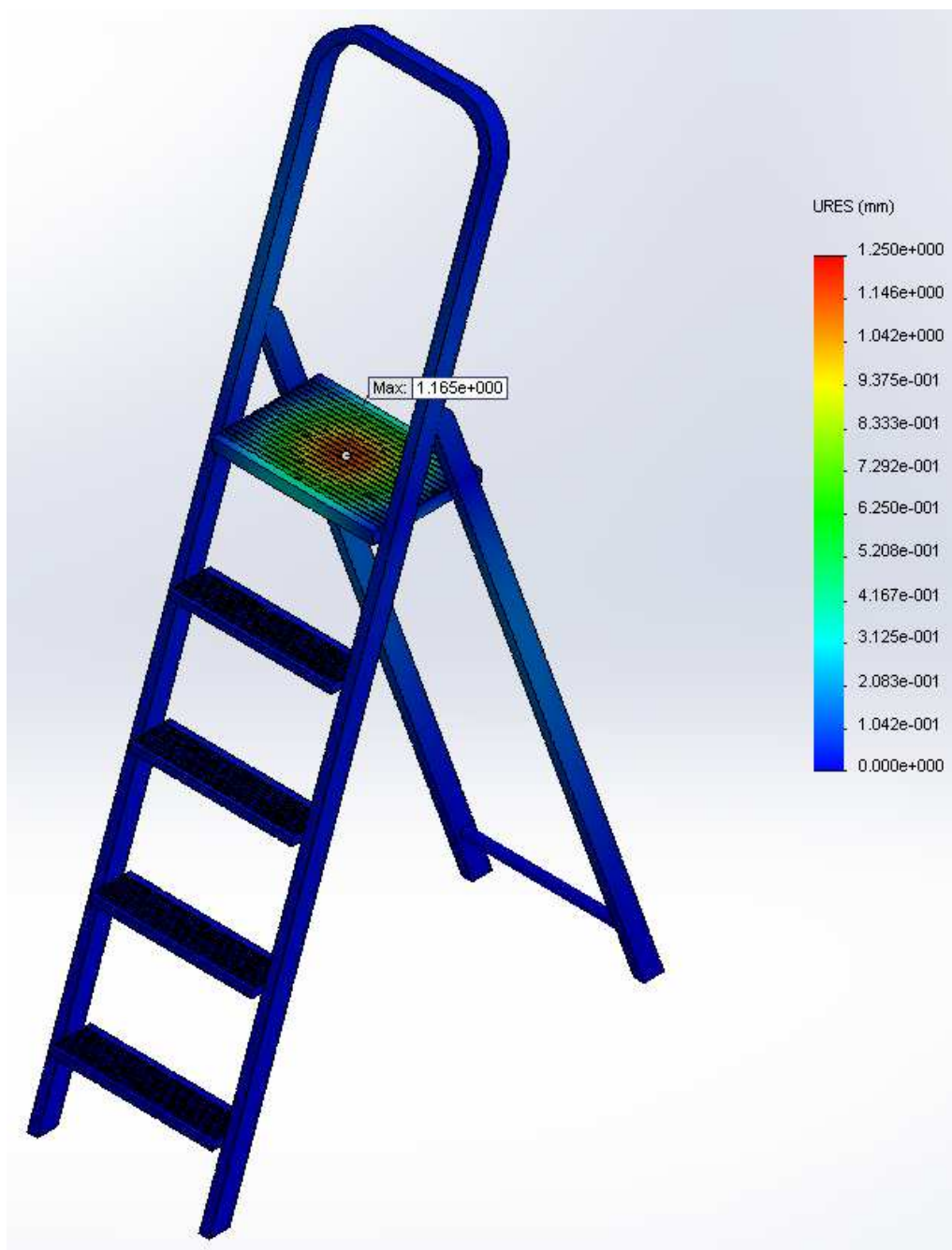
Na rysunku 6 przedstawiono wykres odkształcenia konstrukcji w obszarze najwyższego stopnia drabiny. Największe odkształcenie nie przekraczające około 0,0003 nastąpiło w miejscach, gdzie wystąpiły najwyższe obciążenia – w miejscach łączenia stopnia z ramą, na środku ścian czołowych stopnia i na środku stopnia. Maksymalne odkształcenie wystąpiło na małej powierzchni w miejscu łączenia stopnia z ramą i wyniosło 0,0008929. Wartości te są niewielkie, nie powinny więc istotnie wpłynąć na geometrię konstrukcji.



Rysunek 6. Wykres odkształcenia konstrukcji – widok najwyższego stopnia
Figure 6. Model deformation – highest step

Wygenerowano również wykres przemieszczeń konstrukcji, który przedstawiono na rysunku 7. W wyniku działania siły mogłoby dojść do niewielkiej zmiany geometrii

konstrukcji. Największe przemieszczenie wystąpiło na środku stopnia i wyniosło 1,165 mm. Wystąpiło również nieznaczne przemieszczenie w połowie tylnych nóg drabiny na poziomie około 0,1 mm. Reszta konstrukcji pozostała nienaruszona. Przemieszczenia te są jednak niewielkie i przy takich wymiarach konstrukcji byłyby praktycznie niewidoczne gołym okiem.



Rysunek 7. Wykres przemieszczenia wypadkowego konstrukcji
Figure 7. Model displacement

6. PODSUMOWANIE

Wykonanie modelu i badania symulacyjne MES pozwoliły na określenie obszarów najbardziej narażonych na uszkodzenia konstrukcji lub zmiany jej geometrii przy obciążeniu stopnia siłą o wartości 981 N skierowaną pionowo w dół. Na rozkład naprężeń w modelu istotny wpływ mają założenia modelowe oraz zastosowane warunki brzegowe. Otrzymane wyniki mogą odbiegać od rzeczywistych wartości naprężeń ze względu na podział na elementy skończone oraz uproszczenie modelu konstrukcji.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, że obszarami najbardziej narażonymi na uszkodzenia są miejsca połączenia stopnia z ramą drabiny oraz środek ścian czołowych stopnia. Obciążenie konstrukcji siłą 981 N nie spowodowało wystąpienia naprężeń przekraczających wytrzymałość wybranego materiału, jednak w przypadku występowania obciążeń cyklicznych istnieje zagrożenie powstawania pęknięć zmęczeniowych.

Analiza naprężeń przy pomocy metody elementów skończonych jest coraz częściej stosowaną metodą w zakresie inżynierii materiałowej i mechaniki. Zastosowanie metod komputerowego wspomaganie pozwala na wykonanie zadań trudnych do rozwiązania metodami analitycznymi, dzięki czemu możliwe jest wykonywanie obliczeń nawet w przypadku złożonych obiektów. Wykonanie symulacji zamiast badań doświadczalnych przekłada się bezpośrednio na obniżenie kosztów projektowania i optymalizacji produktu.

LITERATURA

1. B. Mańka, A. Śliwa, Przykłady zastosowania MES do analizy wybranych zagadnień w inżynierii materiałowej, Prace Studenckich Kół Naukowych, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska, Gliwice, Zeszyt 26/2010, 37-44.
2. P. Papliński, A. Śliwa, Analiza wytrzymałościowa elementu konstrukcji lampy wiszącej LED z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych, Prace Studenckich Kół Naukowych, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska, Gliwice, Zeszyt 28/2014, 73-80.
3. S. Łączek, Modelowanie i analiza konstrukcji w systemie MES ANSYS v.11, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2011.
4. E. Rusiński, Metoda elementów skończonych, system COSMOS, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1994.
5. A. Irla, A. Śliwa, Przykłady zastosowania MES do analizy wybranych zagadnień w inżynierii materiałowej, Prace Studenckich Kół Naukowych, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska, Gliwice, Zeszyt 28/2014, 11-18.
6. G. Rakowski, Z. Kacprzyk, Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
7. K. Lawrence, Ansys Tutorial-release 6.1, SDC Schroff Development Corporation, 2002.

8. J. Baker, Ansys exercise – Ansys Tutorial.
9. strona internetowa: <http://www.ansys.com> – dostęp 10.01.2015 r.
10. M.R. Hatch, Vibration using MATLAB and ANSYS, Chapman & Hall/CRC, 2001.