

Dr inż. Maciej TROJNACKI, inż. Katarzyna BŁASZCZYKIEWICZ
Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Email: mtrojnacki@meil.pw.edu.pl

Mgr inż. Maciej CADER
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP
Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa
Telefon: +48 22 8740 341, email: mcader@piap.pl

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII PRZYROSTOWEGO KSZTAŁTOWANIA WYROBÓW DO WYKONANIA PROTOTYPU ROBOTA MOBILNEGO CAMELEON

W pracy opisano koncepcję i projekt konstrukcji robota o zmiennej konfiguracji Cameleon. Przedstawiono wyniki symulacji ruchu robota w programie MD Adams. Zaprezentowano wyniki statycznych prób rozciągania dla próbek wykonanych z wybranych materiałów mających zastosowanie w technologiach przyrostowego wytwarzania wyrobów. Na podstawie wyników laboratoryjnych badań materiałowych oraz wyznaczonych sił i momentów sił działających na konstrukcję robota przeprowadzono w programie Ansys analizę wytrzymałościową dla wybranych elementów konstrukcji robota pod kątem możliwości wytworzenia ich z zastosowaniem technologii przyrostowych.

ANALYSIS OF APPLICABILITY OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY TO PROTOTYPING OF THE MOBILE ROBOT CAMELEON

The paper describes conception and design of the reconfigurable robot Cameleon. Results of simulation of robot's motion in MD Adams software environment are presented. Also included are results of static tensile tests of samples made of selected materials commonly used with additive manufacturing technologies. Based on the material properties and construction loads obtained from previously described research, strength analysis for chosen robot's parts was carried out in Ansys software to evaluate the possibility of producing those parts using additive manufacturing technology.

1. WPROWADZENIE

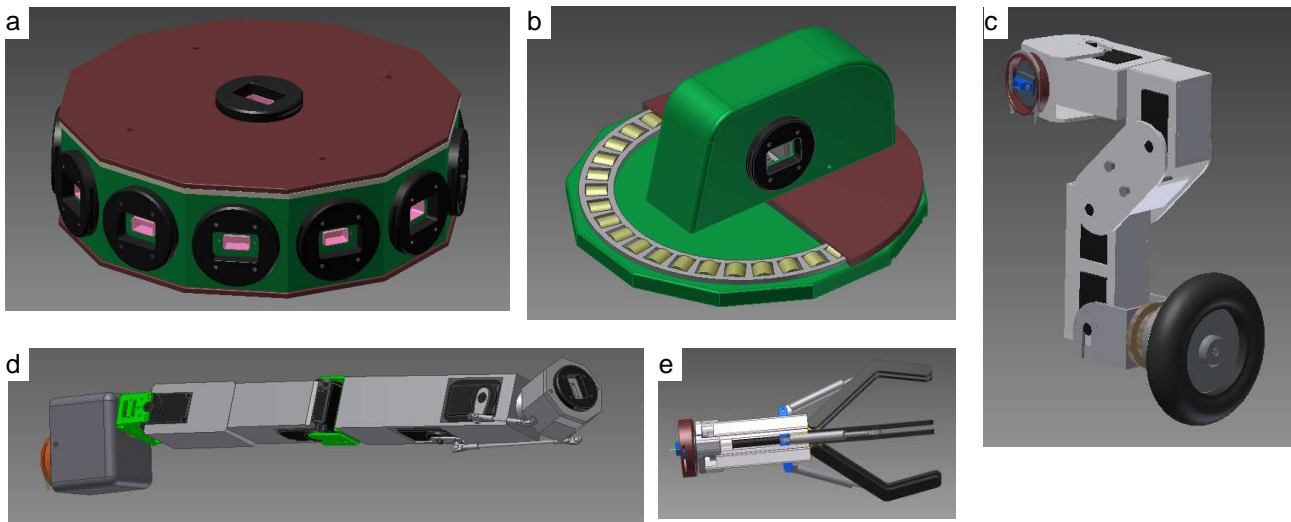
Technologie przyrostowego kształtowania wyrobów ze względu na swoje zalety, takie jak m.in. szybkość wytwarzania i łatwość oszacowania jego kosztów cieszy się coraz większą popularnością. Technologie te stają się alternatywą dla tradycyjnych technologii produkcji, np. obróbki skrawaniem, odlewania, itp. Wybór technologii zależy m.in. od kształtu elementów. W przypadku prostych kształtów tradycyjne technologie mogą być szybsze i tańsze. Natomiast w przypadku, gdy elementy mają bardziej skomplikowane kształty tańsze może być zastosowanie technologii przyrostowego wytwarzania. Niektóre elementy ze względu na kształt mogą być wykonane tylko metodami wydruku 3D. W celu efektywnego wykorzystania tych metod niezbędne jest prowadzenie prac badawczych z zakresu inżynierii materiałowej polegających przede wszystkim na wyznaczeniu charakterystyk materiałowych. Wyniki takich badań mogą być podstawą do dalszych analiz wytrzymałościowych części maszyn przeznaczonych do ich wytworzenia w postaci wydruków 3D. Niniejsza praca opisuje metodykę analizy możliwości zastosowania technologii przyrostowego kształtowania wyrobów na przykładzie modelu robota mobilnego Cameleon.

2. ROBOT MOBILNY O ZMIENNEJ KONFIGURACJI CAMELEON

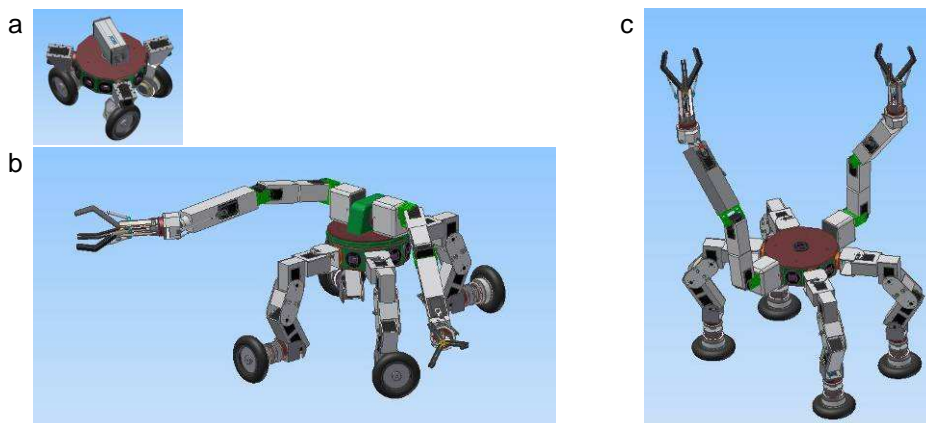
Cameleon jest robotem o zmiennej konfiguracji, co oznacza, że może być dostosowywany do zaplanowanego zadania. Robot składa się z modułów, do których należy tzw. „moduł rodzica” oraz tzw. „moduły dzieci”, którymi są elementy wykonawcze lub czujniki. Robot składa się z następujących modułów: korpus (R), wieża (T), manipulator (M), pedipulator (P), moduł hybrydowy koło-stopą (H) i chwytak (G). Modele CAD tych modułów, pokazane na Rys. 1, opracowano w programie Autodesk Inventor.

Najważniejszym modułem jest korpus (moduł „rodzica”), który ma wymiary 0,32 m x 0,32 m x 0,06 m. Na obwodzie korpusu znajduje się dwanaście złączy interfejsu, a kolejne dwa znajdują się w jego górnej i dolnej części. Umieszczone na korpusie złącza interfejsu służą do mocowania modułów: elementów wykonawczych, kamer wizyjnych i czujników.

Masy poszczególnych modułów wynoszą w przybliżeniu: korpus (bez akumulatora) 1,083 [kg], moduł wieży 0,656 [kg], manipulator 1,104 [kg], chwytak 0,5 [kg], pedipulator 0,968 [kg], moduł hybrydowy koło-stopą 0,496 [kg]. Masa całkowita robota wynosi 7,9 [kg]. Przykładowe konfiguracje robota możliwe do uzyskania po połączeniu wybranych jego modułów pokazano na Rys. 2. Nie wyczerpują one oczywiście możliwości robota, które mogą zależeć od pomysłowości i potrzeb użytkownika.



Rys. 1. Modele CAD wybranych modułów robota: a – korpus, b – wieża, c – pedipulator z modułem hybrydowym koło-stopą, d – manipulator, e – chwytak



Rys. 2. Przykładowe konfiguracje robota Cameleon: a – robot trzykołowy z modułem wizyjnym, b – robot z czterema nogami zakończonymi kołami, wieżą i dwoma manipulatorami, c – robot czteroноżny z dwoma manipulatorami

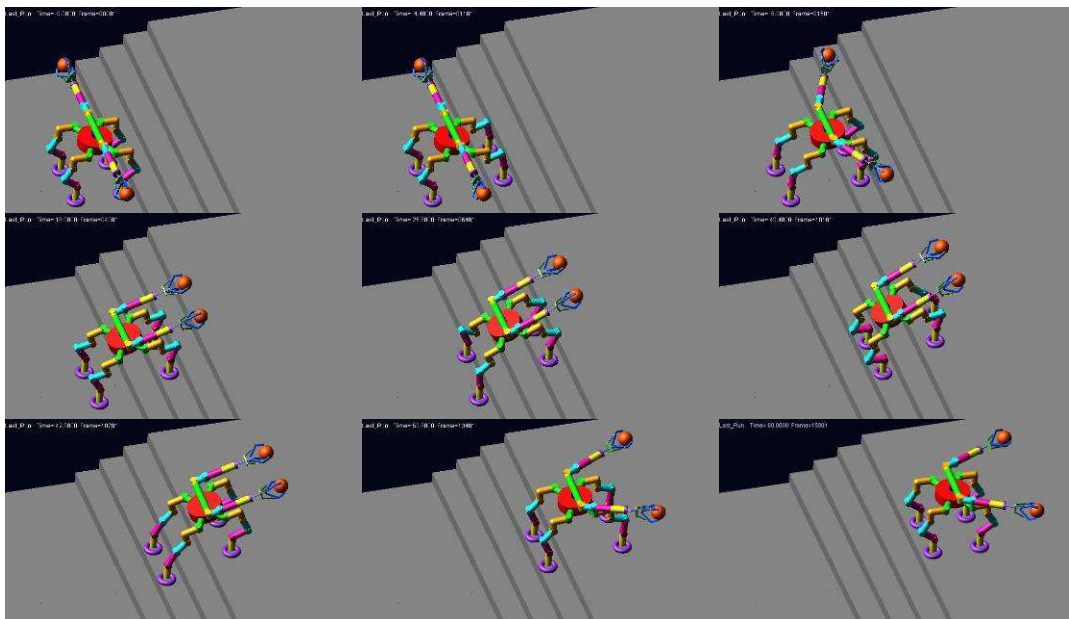
Konstrukcja mechaniczna modułów robota została szerzej omówiona w publikacji [4], natomiast publikację [1] poświęcono problemom planowania optymalnego procesu wytwarzania modułów robota w technologii FDM, tj. manipulowania parametrami wydruku. Niniejsza publikacja koncentruje się natomiast na analizie możliwości wytworzenia konkretnych elementów robota przy użyciu wytypowanych w toku prac badawczych technologii przyrostowego kształtowania wyrobów, potencjalnie nadających się do wykorzystania w produkcji ruchomych części maszyn. Podstawą tej analizy są badania symulacyjne ruchu robota oraz wyniki statycznych prób rozciągania próbek wybranych materiałów przeznaczonych na wydruki 3D, ponieważ stanowią one podstawę do wykonania kompleksowych analiz wytrzymałościowych z zastosowaniem środowiska Ansys.

3. SYMULACJA RUCHU ROBOTA W PROGRAMIE MD ADAMS

Program MD Adams umożliwia analizę ruchu złożonych układów mechanicznych, przede wszystkim tych, których analiza metodami analitycznymi jest trudna i bardzo pracochłonna. Wyniki symulacji ruchu pozwalają m.in. na wstępny dobór napędów i wyznaczenie warunków brzegowych do wykonania symulacji wytrzymałościowych. Znajomość sił i momentów sił działających na konstrukcję jest kluczowa w trakcie procesu projektowania. [6]

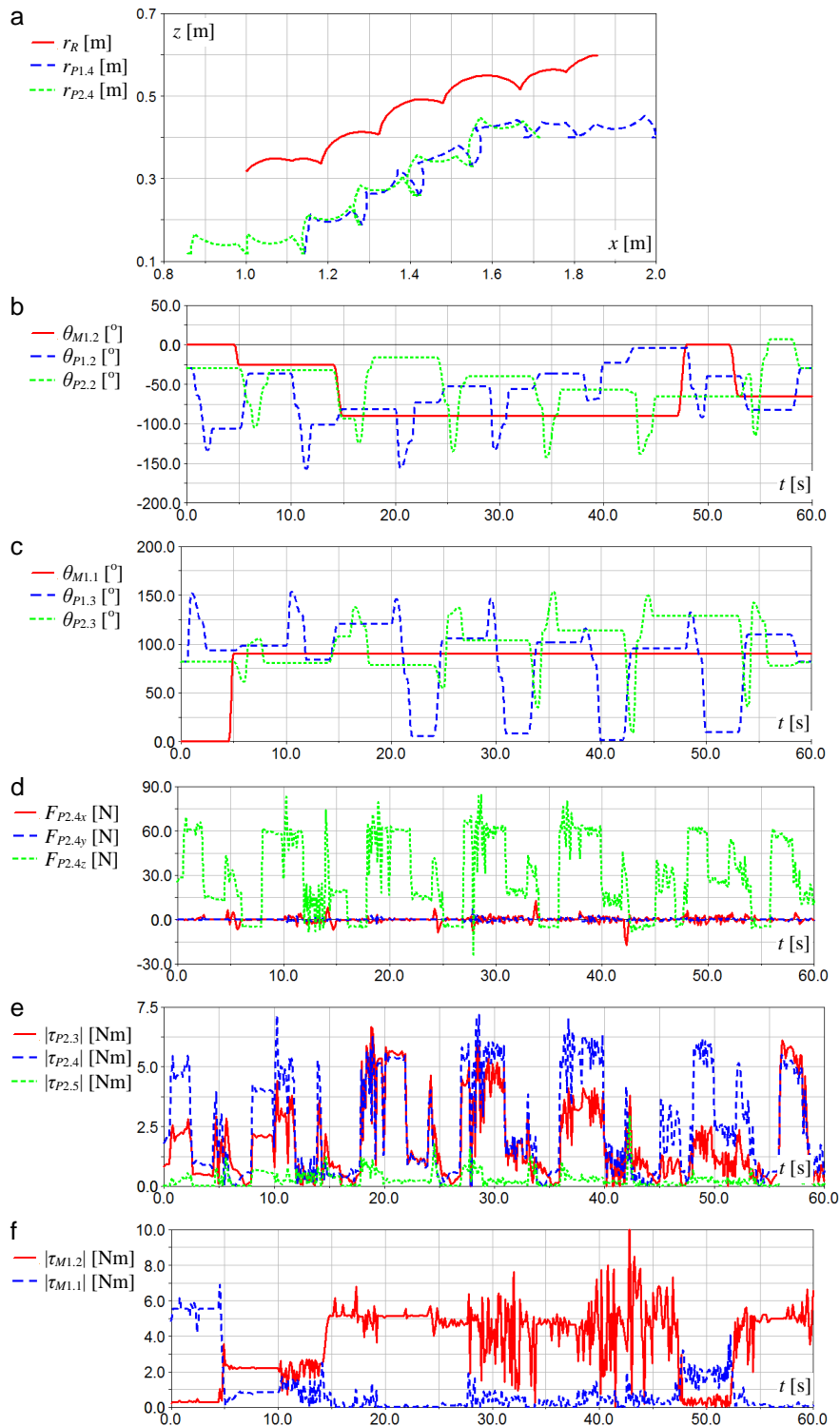
Na Rys. 3 zilustrowano poklatkowo przykładową symulację ruchu przeprowadzoną w programie MD Adams polegającą na wspinaniu się robota po schodach. Symulacja ta m.in. ze względu na duże i zmienne obciążenie robota jest dobrą podstawą do dalszej analizy wytrzymałościowej wybranych elementów konstrukcji.

Robot wspinając się po schodach przestawiając pojedynczo kolejne nogi, przy czym najpierw przenoszone są nogi znajdujące się z przodu a następnie z tyłu. Pomiędzy fazami przestawień nóg przednich i tylnych następuje przemieszczanie korpusu. W związku z tym pojedyncza sekwencja przenoszenia nóg i ruchu korpusu składa się z pięciu faz. Przemieszczenie korpusu następuje także w ostatniej fazie ruchu, po której robot ma konfigurację zbliżoną do tej, jaką miał przed rozpoczęciem sekwencji wspinania się po schodach. Stabilność postury jest zapewniona przede wszystkim poprzez odpowiedni rozkład masy robota w trakcie jego ruchu, w szczególności poprzez realizację odpowiednich ruchów manipulatorami kompensujących przemieszczenia środka masy robota.



Rys. 3. Poklatkowa symulacja wspinania się robota po schodach

W wyniku symulacji wyznaczono siły i momenty sił działające na poszczególne elementy konstrukcji robota, które będą stanowiły warunki brzegowe do analiz wytrzymałościowych, i niezbędne do ruchu momenty napędowe. Przykładowe uzyskane wyniki pokazano na Rys. 4. Problematyka symulacji ruchu robota w programie MD Adams została szerzej omówiona w artykule [3]. Animacje ruchu robota można z kolei znaleźć pod adresem [5].



Rys. 4. Wybrane wyniki symulacji wspinania się robota po schodach: tory ruchu punktów R (środek geometryczny korpusu), $P1.4$ i $P2.4$ (kostki nóg 1 i 2) (a), kąty w parach kinematycznych manipulatora i nóg (b, c), składowe siły reakcji w punkcie $P2.4$, tj. kostce nogi nr 2 (d), momenty napędowe (e, f)

4. STATYCZNE PRÓBY ROZCIĄGANIA MATERIAŁÓW

Na potrzeby badań zostały wykonane w PIAP próbki materiałów z zastosowaniem technologii FDM przy użyciu centrum wytwórczego Fortus 400mc firmy Stratasys (Rys. 5a). Maszyna składa się z czterech modułów, którymi są:

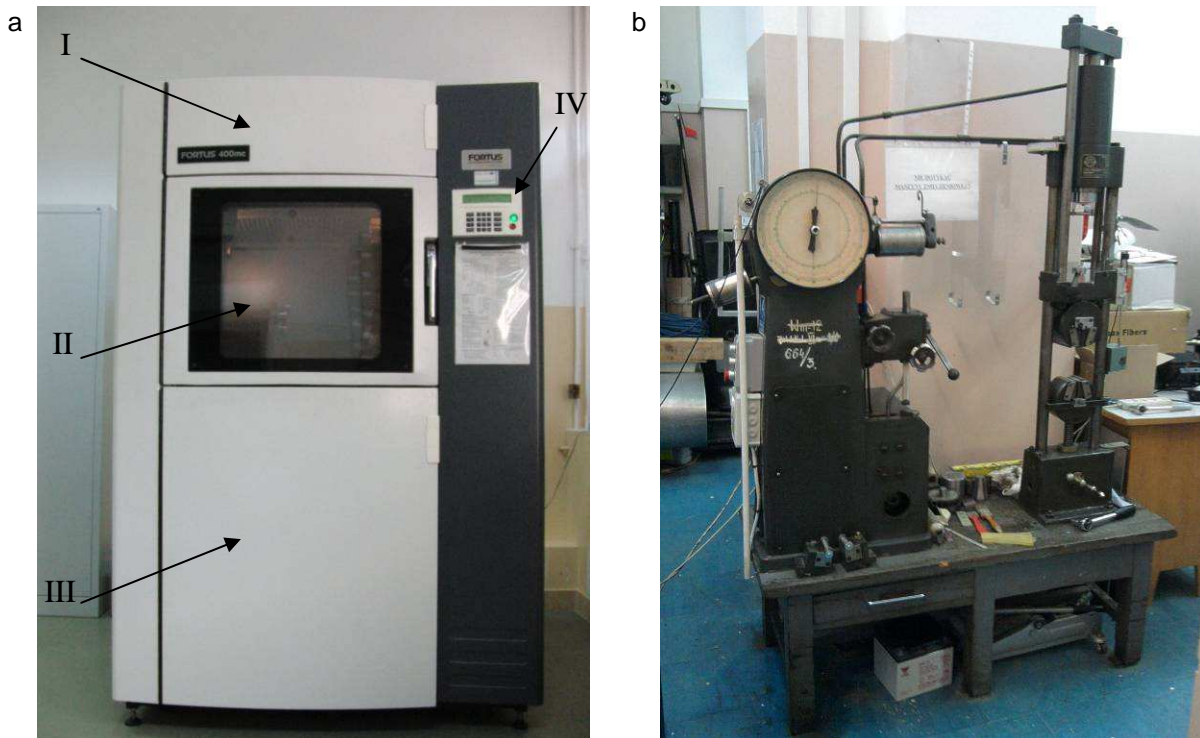
- komora z suwnicą (I), na której zamontowana jest głowica z dyszami rozpraszającymi materiał,
- komora robocza ze stołem modelowym (II), na którym budowany jest model poprzez przyrostowe nakładanie materiału,
- komora z kasetami materiałowymi (III),
- panel sterowania (IV).

Na potrzeby badań wykonano także próbki z zastosowaniem technologii SLS i PolyJet.

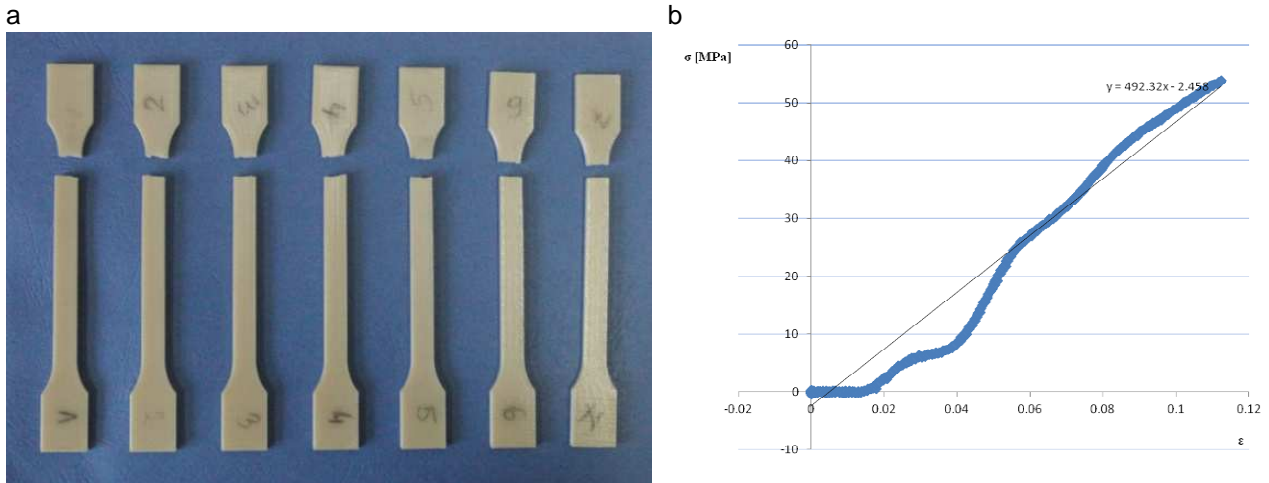
Badanie próbek polegało na osiowym ich rozciąganiu narastającą siłą, aż do chwili zerwania. Przygotowanie próbek i przeprowadzenie badań, jak również interpretacja wyników były realizowane zgodnie z normami PN-EN ISO 527 i PN-EN 10002-1. [2]

Badania wykonano przy użyciu typowej maszyny wytrzymałościowej (tzw. zrywarki) o napędzie hydraulicznym (Rys. 5b).

Na początku wykonano badania dla próbek wykonanych w technologii FDM, z materiałów PC i ULTEM 9085. Po przeprowadzeniu badań na pierwszej serii próbek (Rys. 6a) zaobserwowano występowanie efektu karbu na każdej z próbek. Okazało się, że efekt ten powstał w wyniku wydruku, podczas którego maszyna drukująca zaczynała nakładanie warstw płynnego materiału dokładnie w tym samym miejscu, przez co płyn nawarstwił się tworząc karb. Podejrzewając, że obecność karbu ma wpływ na wytrzymałość materiału, postanowiono przeprowadzić ponowne badanie, gdzie wyeliminowano karb poprzez zmodyfikowanie procesu wytwarzania – głowica dla każdej warstwy nakładanego materiału rozpoczynała proces w innym miejscu. W ten sposób zostały wydrukowane dodatkowe próbki z materiału ULTEM 9085.



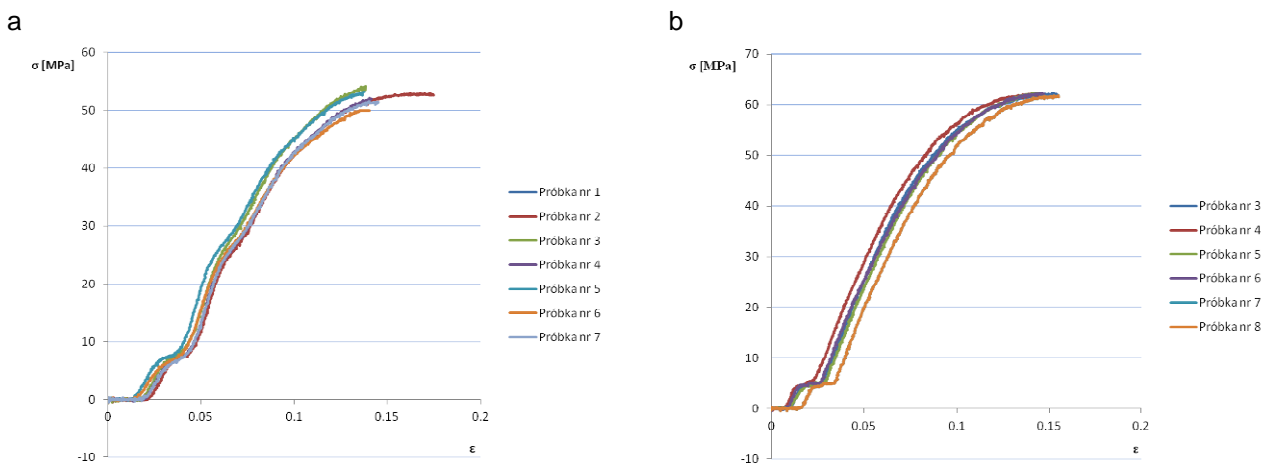
Rys. 5. Maszyna Fortus 400mc firmy Stratasys znajdująca się w PIAP (a), maszyna wytrzymałościowa (zrywarka) będąca na wyposażeniu Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej (b)



Rys. 6. Próbki z karbem wykonane z materiału ULTEM 9085 po zerwaniu (a), wykres $\sigma(\epsilon)$ i prosta aproksymująca – próbka z karbem wykonana z materiału ULTEM 9085 – moduł Younga $E = 492,32$ [MPa] (b)

Na podstawie wykonanych badań na wszystkich próbkach opracowano wykresy $\sigma(\epsilon)$, tj. naprężeń umownych od odkształceń umownych. Następnie wyznaczono moduł Younga aproksymując otrzymane przebiegi w wybranym przedziale przy pomocy prostych (Rys. 6b). Wybrane wykresy $\sigma(\epsilon)$ otrzymane w wyniku badań pokazano na Rys. 7, natomiast w Tab. 1 pokazano otrzymane wyniki w postaci zbiorczej.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że materiał ULTEM 9085 charakteryzuje się najlepszymi właściwościami mechanicznymi spośród badanych materiałów, a dokładnie najwyższą wartością wytrzymałości na rozciąganie R_m .



Rys. 7. Wykres $\sigma(\epsilon)$ dla próbek z karbem wykonanych z materiału PC (a) i dla próbek bez karbu wykonanych z materiału ULTEM 9085 (b)

Materiał	Technologia	Moduł Younga E [MPa]			Siła zrywająca F_{max} [kN]		Granica plastyczności R_m [MPa]	
		Dane katalogowe	Dla próbek z karbem	Dla próbek bez karbu	Dla próbek z karbem	Dla próbek bez karbu	Dla próbek z karbem	Dla próbek bez karbu
PC	FDM	446	407.49	-	2.08	-	52.03	-
ULTEM 9085	FDM	500	488.42	499.23	2.23	2.47	55.78	61.77
PA 2200	SLS	416	-	342.47	-	2.00	-	50.18
FC 720	PolyJet	520	-	334.98	-	2.06	-	51.54

Tab. 1. Zbiorcze wyniki badań próbek materiałów

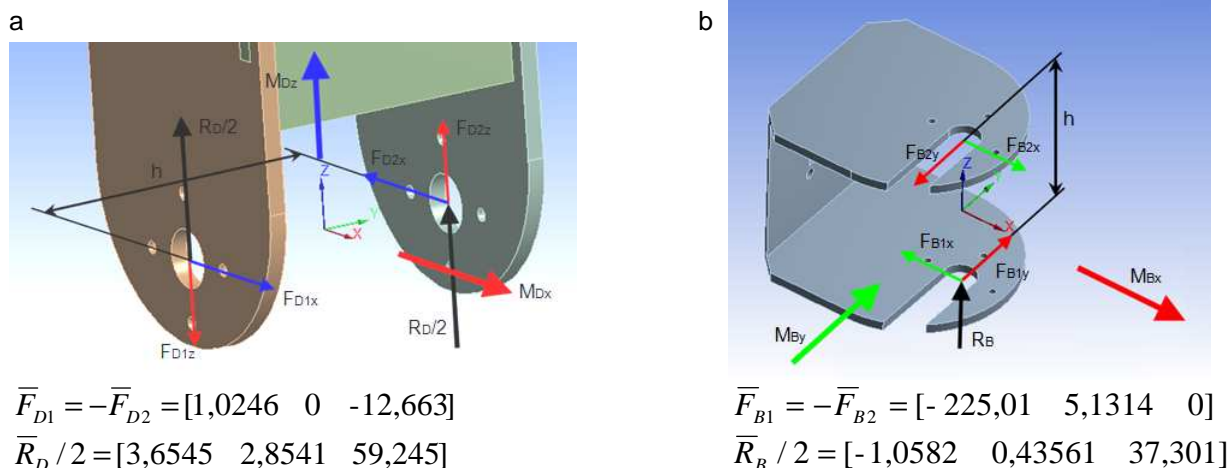
5. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ELEMENTÓW ROBOTA

W celu przeprowadzenia analiz wytrzymałościowych wybranych elementów konstrukcji robota na bazie wyznaczonych stałych materiałowych zastosowano program Ansys. Ansys (and. Analysis Nonlinear System) jest multidyscyplinarnym środowiskiem symulacyjnym służącym do prowadzenia symulacji komputerowych na bazie Metody Elementów Skończonych. Ansys ma zastosowanie w rozwiązywaniu zagadnień z zakresu statyki liniowej i nieliniowej, poprzez termodynamikę, aż po dynamikę explicite i analizy sprzężone (połączenie zagadnień różnych dziedzin fizyki). W ramach opisywanych prac Ansys był wykorzystywany do przeprowadzenia symulacji wytrzymałościowych z zakresu statyki liniowej oraz prostych optymalizacji kształtu konstrukcji. [7]

Przed przystąpieniem do analiz wytrzymałościowych w programie Ansys zdefiniowano dla poszczególnych elementów robota:

- stałe materiałowe (m. in. moduł Younga E) wyznaczone w wyniku badań próbek,
- warunki brzegowe, tj. działające siły i momenty sił.

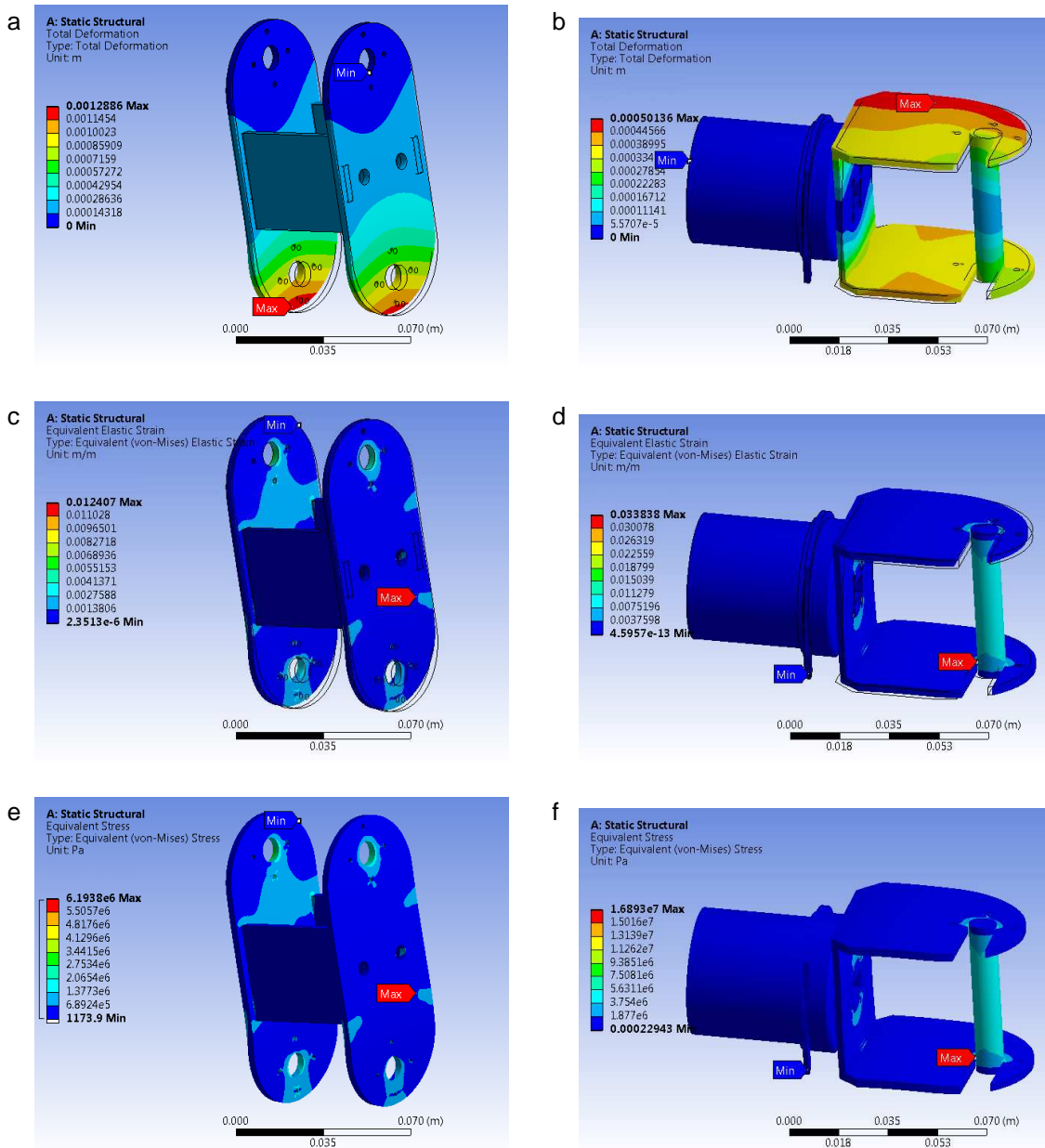
W ramach niniejszej pracy prezentuje się wyniki analiz wytrzymałościowych dla dwóch wybranych elementów konstrukcji robota (jedne z najbardziej obciążonych). Warunki brzegowe do symulacji zilustrowano na Rys. 8. W symulacjach tych wprowadzono parametry materiałowe otrzymane w wyniku badań dla próbek z materiału ULTEM 9085.



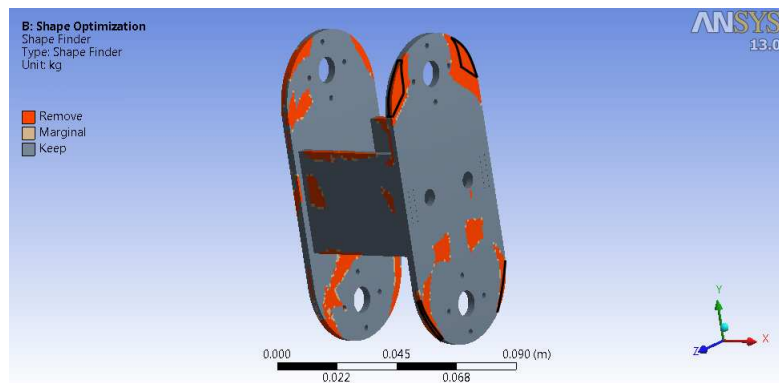
Rys. 8. Warunki brzegowe do analiz wytrzymałościowych dla dwóch wybranych elementów konstrukcji robota (wartości podano w [N])

Na Rys. 9a-b pokazane są uzyskane w wyniku symulacji deformacje obu elementów, a na Rys. 9c-d odkształcenia względne. Maksymalna deformacja dla pierwszej części wynosi ok. 1 [mm], a dla drugiej ok. 0,5 [mm]. Z kolei na Rys. 9e-f widoczny jest rozkład naprężeń działających na te elementy. Maksymalne wartości naprężeń dla obu części wynoszą odpowiednio: 6 [MPa] i 17 [MPa]. W związku z tym współczynniki bezpieczeństwa dla tych części dla analizowanego ruchu robota, zakładając wykonanie ich z materiału ULTEM 9085 wynoszą odpowiednio 10 i 3,7.

Ze względu na to, że w wyniku badań symulacyjnych ruchu robota w programie MD Adams [3] okazało się, że niektóre napędy robota są w analizowanym ruchu po schodach zbyt obciążone, dlatego konieczna jest redukcja masy całej konstrukcji. W tym celu wykonano analizę topologiczną dla poszczególnych elementów konstrukcji robota, tj. wyznaczono miejsca, w których można odjąć materiał. Przykład takiej analizy pokazano na Rys. 10.



Rys. 9. Wyniki analizy wytrzymałościowej dla dwóch wybranych elementów konstrukcji robota



Rys. 10. Przykład analizy topologicznej wybranej części

6. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

W ramach pracy została przeprowadzona analiza możliwości zastosowania materiałów wykorzystywanych w wybranych technologiach przyrostowego wytwarzania do budowy prototypu robota Cameleon. W celu wykonania szczegółowych analiz wytrzymałościowych przeprowadzono symulacje ruchu modelu robota (z uwzględnieniem zagadnień kinematyki oraz dynamiki), co pozwoliło na wyznaczenie warunków brzegowych. Równolegle wykonywano badania wytrzymałościowe próbek, w celu wyznaczenia wymaganych do analiz wytrzymałościowych parametrów materiałowych.

W efekcie analiz wytrzymałościowych okazało się, że najbardziej obciążone elementy konstrukcji nie zostaną zniszczone podczas normalnej pracy robota. Zauważono również, że ze względu na występowanie przeciążenia w napędach należy zmodyfikować syntezę ruchu i możliwie zmniejszyć masę wybranych elementów konstrukcji. W tym celu podjęto już próbę wykonania analizy topologicznej kształtu konstrukcji i wyznaczono miejsca, w których można odjąć materiał.

7. Podziękowania

Autorzy pracy składają serdeczne podziękowania pracownikom Politechniki Warszawskiej, dr hab. inż. Mirosławowi Rodzewiczowi oraz Adamowi Pruszkowskiemu za umożliwienie przeprowadzenia badań na maszynie wytrzymałościowej.

LITERATURA

- [1] Cader M., Trojnacki M.: Projektowanie konstrukcji mechanicznej robota o zmiennej konfiguracji Cameleon z przeznaczeniem do wytworzenia w technologii FDM, *Mechanik 7/2012*, 1-8, dodatek na CD.
- [2] Dobrzański L.: *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- [3] Trojnacki M., Błaszczkiewicz K.: Symulacja wspinania się po schodach robota o zmiennej konfiguracji Cameleon z zastosowaniem programu MD Adams, *Mechanik 7/2012*, 1-8, dodatek na CD.
- [4] Trojnacki M., Cader M.: Projekt konstrukcji robota mobilnego o zmiennej konfiguracji, *Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Seria: Elektronika, Zeszyt 182, Tom 2*, Warszawa 2012, 549-557.
- [5] Trojnacki M.: *Mobile robots – animations and movies*, <http://www.mtrojnacki.republika.pl/MobileRobots/index.html>.
- [6] Wojtyra M., Frączek J.: *Metoda układów wielocłonowych w dynamice mechanizmów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
- [7] Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P.: *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Ćwiczenia z zastosowaniem systemu Ansys*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.