

Inż. Łukasz WILK, e-mail: [luwilk@gmail.com](mailto:luwilk@gmail.com)  
Dr inż. Maciej TROJNACKI, e-mail: [mtrojnacki@piap.pl](mailto:mtrojnacki@piap.pl)  
Mgr inż. Przemysław DĄBEK, e-mail: [pdabek@piap.pl](mailto:pdabek@piap.pl)  
Mgr inż. Maciej CADER, e-mail: [mcader@piap.pl](mailto:mcader@piap.pl)  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

## MODELOWANIE NIETYPOWEJ OPONY ROBOTA MOBILNEGO SCOUT Z ZASTOSOWANIEM SYSTEMÓW CAX

**Streszczenie:** Praca dotyczy modelowania opony robota mobilnego SCOUT. Na początku omówiono istniejące rozwiązania opon kół jezdnych oraz nietypową oponę stosowaną w analizowanym robocie. Przedstawiono wynik badań doświadczalnych próbek materiałów użytych w oponie oraz badań koła z całą oponą oraz z jej wewnętrzną częścią. Na podstawie modelu CAD koła i opony przygotowano model do analiz MES. W wyniku symulacji z użyciem MES wyznaczono charakterystykę sztywności promieniowej opony, którą porównano z tą, którą uzyskano w rezultacie badań doświadczalnych. Uzyskane wyniki potwierdzają słuszność przyjętej metodyki, wg której na podstawie opracowanego modelu CAD opony i znanych parametrów materiałowych można określić sztywność promieniową opony, którą można wykorzystać w badaniach dynamiki całego robota.

**Słowa kluczowe:** mobilny robot kołowy, modelowanie opony, MES, badania symulacyjne, badania doświadczalne

## MODELING OF NON-TYPICAL TIRE OF SCOUT MOBILE ROBOT USING CAX SYSTEMS

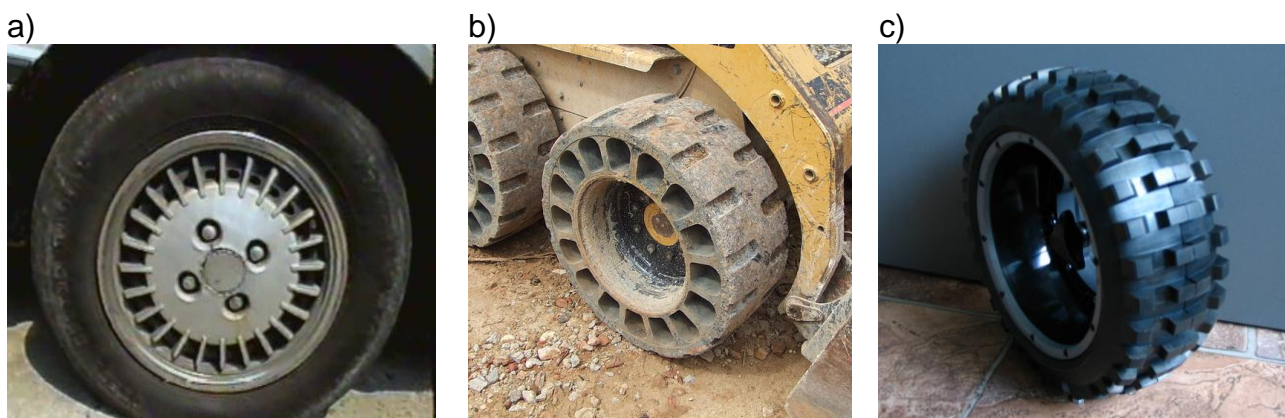
**Abstract:** The work concerns modeling of tire of SCOUT mobile robot. In the beginning existing tire designs are discussed with focus on non-typical airless tire which is used in the SCOUT robot. Results of material specimens' tests are showcased alongside with tests performed on separate wheel assembly components as well as on the complete assembly. Using tire CAD model, finite element analysis is performed. As a result radial stiffness characteristic is obtained, which is compared to the one obtained in empirical tests. Results confirm validity of the methodology, which assumes that using a CAD model and known material properties it is possible to obtain tire radial stiffness, which can be subsequently used in studies of whole robot dynamics.

**Keywords:** wheeled mobile robot, tire modeling, FEM, simulation research, empirical research

### 1. WPROWADZENIE

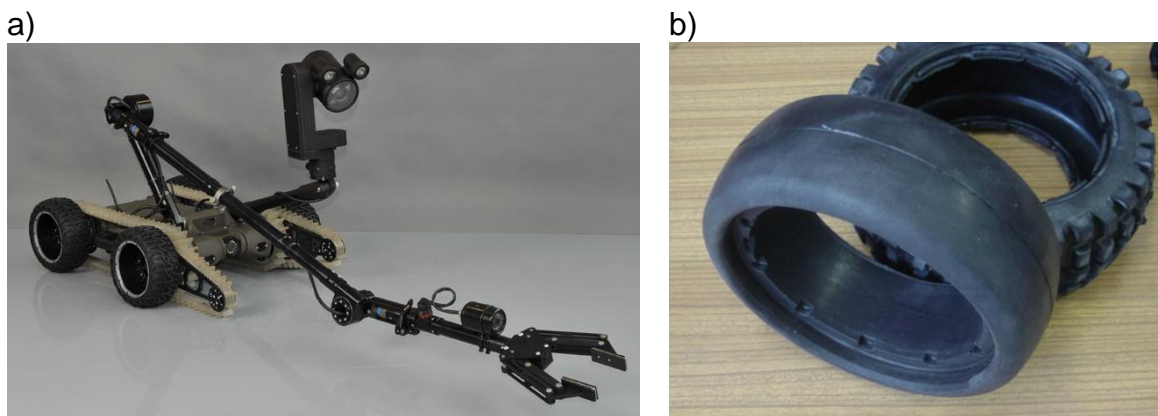
Obecnie spośród dostępnych na rynku robotów mobilnych największą grupę stanowią roboty gaśnicowe [2] i kołowe. W Polsce liderem w sprzedaży robotów mobilnych jest Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP [7]. Spośród kilku produkowanych konstrukcji sporym zainteresowaniem na rynku cieszy się robot SCOUT, którego opony będą przedmiotem badań w niniejszej pracy.

Mówiąc o oponach, najczęściej ma się na myśli koło samochodowe, rowerowe lub motocyklowe. Niezależnie czy wykorzystują one systemy bezdętkowe powszechnie stosowane w samochodach (rys. 1a) czy też posiadają osobną dętkę, jak to najczęściej jest stosowane w rowerach, są to opony pneumatyczne. Jest to najlepiej opisany oraz zbadany segment opon. Wraz z oponami pełnymi (używany m.in. w maszynach przemysłowych, deskorolkach, taczach itp.) stanowią one prawie całość produkcji opon na świecie. Istnieją jeszcze opony niepneumatyczne i jednocześnie niepełne. Ich budowa może opierać się na wykorzystaniu elementów sprężystych (Rys. 1b), tak jak np. w rozwijanym przez firmę Michelin projekcie koła Tweel [6]. Mogą one również składać się z zewnętrznej gumowej części, która zapewnia odpowiednią trakcję oraz wewnętrznego wypełnienia, które jest podatne. Wypełnienie może mieć postać pianki, tak jak w przypadku opony robota SCOUT (rys. 1c).



Rys. 1 Przykłady opon: a – opona pneumatyczna, b – opona niepneumatyczna z promieniowymi elementami sprężystymi, c – opona niepneumatyczna z wkładem piankowym stosowana w robocie SCOUT (zdjęcia w różnej skali)

Największą zaletą opon niepneumatycznych jest ich niezawodność. W przypadku utraty ciśnienia w oponie pneumatycznej pojazd zostaje unieruchomiony. Względnie, można kontynuować jazdę kosztem o wiele gorszych parametrów jezdnych i możliwości dalszego uszkodzenia konstrukcji pojazdu. Ze względu na niezawodność opon niepneumatycznych, zdecydowano się wykorzystać je w robocie mobilnym SCOUT (rys. 2a). Najważniejszymi elementami koła robota SCOUT, jest sztywna felga wykonana z tworzywa sztucznego, zewnętrzna część opony wykonana z fluoroelastomeru, oraz jej wewnętrzna część, tj. piankowe wypełnienie (rys. 2b).



Rys. 2. Robot mobilny SCOUT: a – wersja komercyjna wyposażona w manipulator, b – opona robota: część zewnętrzną z bieżnikiem oraz część wewnętrzną w postaci wkładu piankowego

Podczas projektowania układu jezdnego, oprócz niezawodności opon, ważne są dodatkowo właściwości dynamiczne układu jezdnego. Badania rzeczywistej konstrukcji są długotrwałe i kosztowne. Wykorzystując narzędzia do wspomaganie projektowania inżynierskiego można znacząco usprawnić ten proces. Przebieg prac może przebiegać jak na diagramie na rys. 3. Pierwszym etapem jest opracowanie projektu CAD koła i układu jezdnego i dobór materiałów na oponę. Następnie można przystąpić do badań próbek materiałów, z których mają być wykonane poszczególne elementy opony koła jezdnego. Znając charakterystyki materiałów stosowanych w oponie robota można następnie przeprowadzić statyczną analizę MES, w wyniku której można otrzymać charakterystykę sztywności opony.

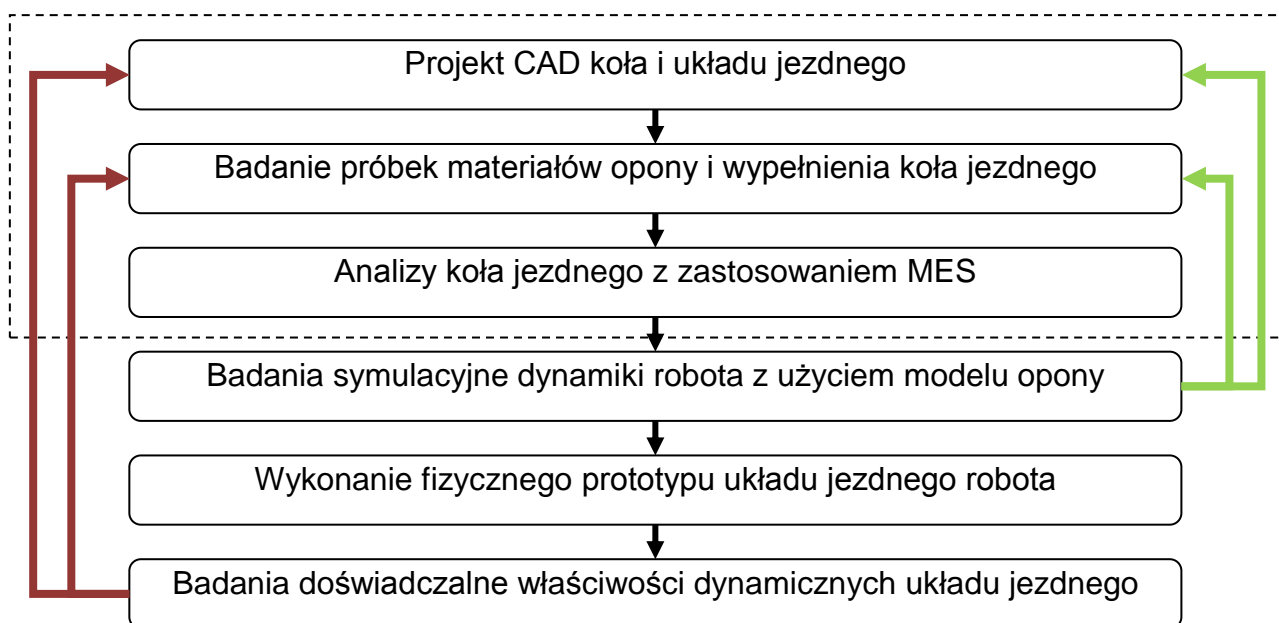
Przeprowadzając natomiast analizę dynamiczną można dodatkowo wyznaczyć tłumienność. Wyznaczenie tych dwóch parametrów jest kluczowe do przeprowadzenia badań symulacyjnych dynamiki całego robota, np. w celu określenia jego mobilności [4].

Należy zwrócić uwagę, że znajomość charakterystyk sztywności i tłumienności na kierunku

promieniowym opony nie wystarczy do przeprowadzenia symulacji dynamiki całego robota w pełnym zakresie. Do innych istotnych charakterystyk można zaliczyć np. charakterystykę sztywności i tłumienności skrętnej opony [1], czy charakterystyki opony związane z zależnościami sił i momentów sił na styku opony i podłoża w funkcji poślizgu wzdłużnego i poprzecznego [3, 5].

Jeśli właściwości dynamiczne wynikające z badań symulacyjnych wirtualnego prototypu robota nie będą satysfakcjonujące, wówczas można wrócić do poprzednich kroków i zmodyfikować parametry materiałowe lub geometryczne opony. Bez użycia oprogramowania CAx, konstruktor zmuszony byłby do wykonania fizycznego prototypu oraz wykonania badań doświadczalnych. Dopiero po tym etapie można by było wrócić do początku procesu i wprowadzać zmiany konstrukcyjne, mając nadzieję, że kolejny wykonany prototyp będzie spełniał wymagania stawiane przed konstrukcją.

W artykule skupiono się jedynie na wyszczególnionej części schematu.



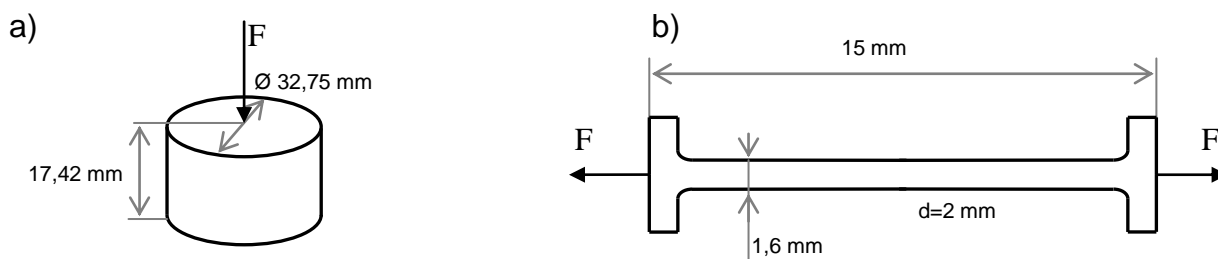
Rys. 3. Schemat metodyki projektowania układu koła jezdnego z wykorzystaniem oprogramowania CAx

## 2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

W ramach badań doświadczalnych, wykonano stanowisko do prób jednoosiowego ściskania oraz jednoosiowego rozciągania. Stanowisko pozwoliło nie tylko na badanie próbek materiałowych wyciętych z opony, ale także na badanie poszczególnych części. Przeprowadzono następujące badania doświadczalne:

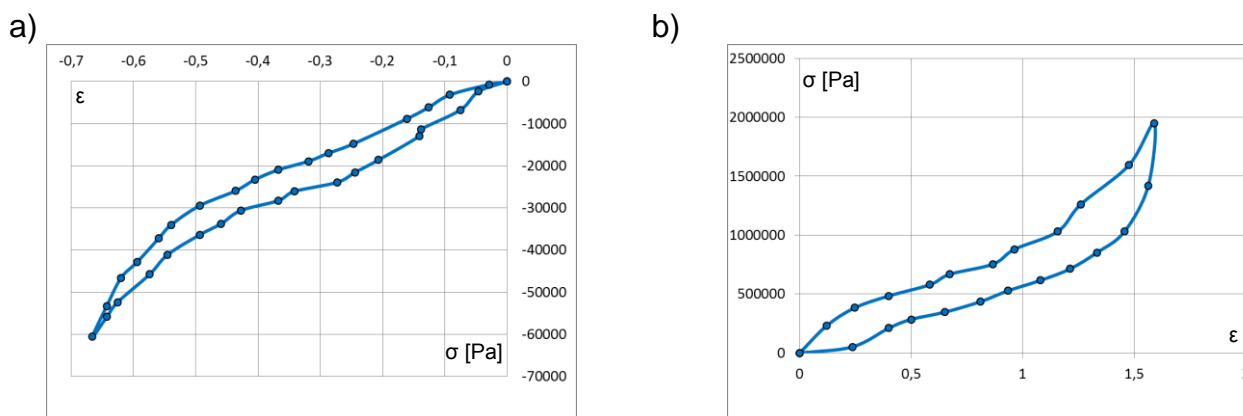
- próba jednoosiowego rozciągania gumowej próbki opony,
- próba jednoosiowego ściskania piankowej próbki wypełnienia,
- próba jednoosiowego ściskania wypełnienia zamocowanego na feldze,
- próba jednoosiowego ściskania powłoki opony zamocowanej na feldze,
- próba jednoosiowego ściskania całej opony (tj. wraz z wypełnieniem).

Na początku zajęto się badaniami wytrzymałościowymi próbek materiałowych. Z wkładu opony wycięto próbkę walcową o średnicy 32,75 mm i wysokości 17,42 mm (rys. 4a). Próbkę poddano jednoosiowemu ściskaniu. Z kolei z zewnętrznej części opony wycięto próbkę wiosełkowatą o długości 15 mm, szerokości 1,6 mm i grubości 2 mm (rys. 4b). Niestandardowe wymiary próbek wynikają z rozmiarów części, z których zostały wycięte.



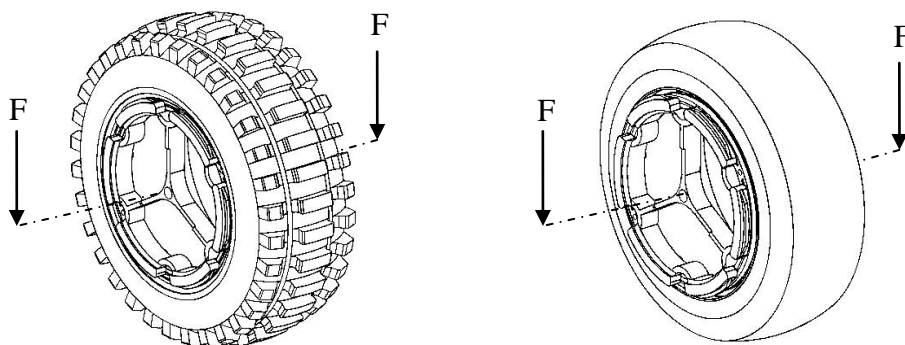
Rys. 4. Wymiary próbek materiałowych wyciętych z komponentów opony

Próbki zostały poddane dużym deformacjom. Na wykresach pokazanych na rys. 5 widać dokładnie nieliniowość charakterystyki sztywności materiału. Niestety ze względu na ograniczenia stanowiska badawczego (ręczna zmiana obciążeń), wykonanie wielu serii obciążania i odciążania próbek było znacznie utrudnione. Z tego powodu niemożliwe było uzyskanie stabilnej pętli obciążania-odciążania, a więc efekt Mullinsa występujący w materiałach gumowych i gumopodobnych został pominięty.



Rys. 5. Wyniki badań doświadczalnych próbek wyciętych z części opony: a – wykres ściskania próbki walcowej wkładu, b – wykres rozciągania próbki wosłkowej z zewnętrznej części opony

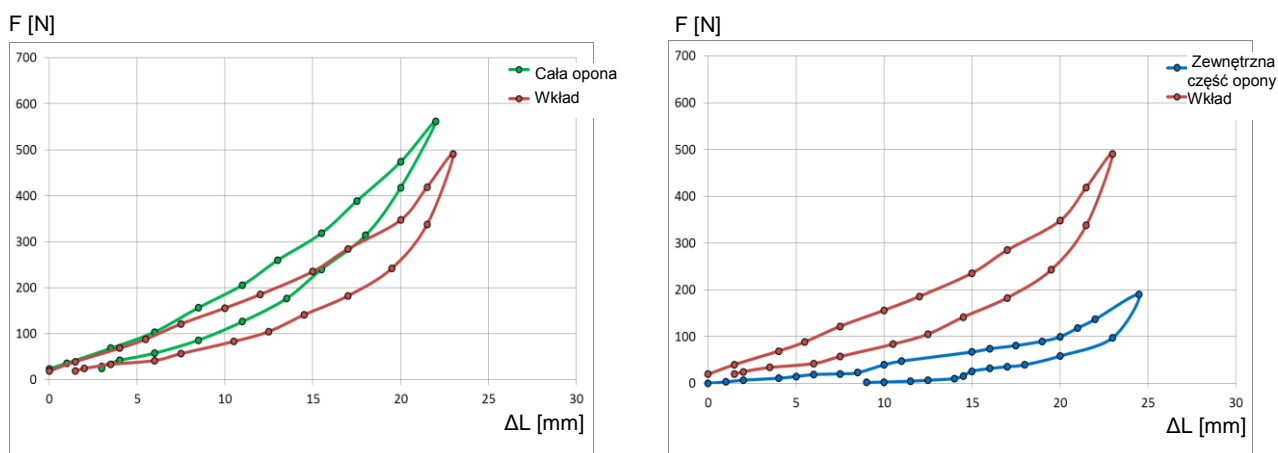
Z kolei badania przeprowadzone na częściach opony pomogły ustalić, jaki udział w ogólnej sztywności koła mają poszczególne jej komponenty. Części obciążono siłą pionową, przyłożoną na osi koła (rys. 6). Uzyskane wykresy deformacji promieniowej opony w funkcji obciążenia pionowego (rys. 7) służą do walidacji modelu MES. Celem badań jest uzyskanie zbliżonych charakterystyk otrzymanych w wyniku symulacji MES do analogicznych charakterystyk uzyskanych w ramach badań doświadczalnych.



Rys. 6. Schemat obciążenia części opony



Patrząc na charakterystyki sztywności wkładu, zewnętrznej części opony oraz całej opony (rys. 7) można zauważyć, że główny wpływ na sztywność całej opony ma sztywność jej wkładu. Sztywność zewnętrznej części opony z kolei jest niewielką składową, jednak nie jest pomijalnie mała.



Rys. 7. Deformacja promieniowa w funkcji obciążenia pionowego dla poszczególnych komponentów i całej opony

### 3. ANALIZY KOŁA JEZDNEGO Z ZASTOSOWANIEM MES

W ramach analizy MES:

- wybrano odpowiednie modele konstytutywne do wykorzystanych materiałów opony,
- wyznaczono parametry modeli konstytutywnych na podstawie wyników badań doświadczalnych,
- zweryfikowano poprawność doboru modeli oraz ich parametry porównując wyniki symulacji MES z wynikami prób wytrzymałościowych, opisanymi w rozdziale 2.

Do symulacji działania materiału, z którego został wykonany wkład opony, wykorzystano trójparametrowy zmodyfikowany model konstytutywny Ogdena dla materiałów ściśliwych, dla którego funkcja gęstości energii odkształcenia ma postać:

$$W = \sum_{k=1}^N 2 \frac{\mu_k}{\alpha_k} \left( \lambda_1^{\alpha_k} + \lambda_2^{\alpha_k} + \lambda_3^{\alpha_k} - 3 + f(J) \right), \quad (1)$$

gdzie funkcja  $f(J)$  może przyjmować postać:

$$f(J) = \frac{1}{\beta_k} \left( J^{-\alpha_k \beta_k} - 1 \right). \quad (2)$$

Dobrano następujące parametry modelu:

- |   |                   |
|---|-------------------|
| • Współczynnik sprężystości objętościowej | $5,87 \cdot 10^9$ |
| • Moduł 1                                 | 2970              |
| • Wykładnik dewiacyjny 1                  | 1,243             |
| • Wykładnik objętościowy 1                | 1,023             |
| • Moduł 2                                 | 10 490            |
| • Wykładnik dewiacyjny 2                  | 1,246             |
| • Wykładnik objętościowy 2                | -1,445            |
| • Moduł 3                                 | 13 890            |
| • Wykładnik dewiacyjny                    | 30,712            |
| • Wykładnik objętościowy 3                | 1,242             |

Należy zwrócić uwagę na wykładnik objętościowy 2, który jest ujemny. Zawsze dobrą praktyką jest unikanie wartości ujemnych parametrów modeli konstytutywnych ze względu na stabilność materiału. Przyjmując jakikolwiek parametr ujemny, ryzykujemy niestabilność materiału, a w efekcie problemy numeryczne z uzyskaniem rozwiązania. Jednak, eksperymenty na próbkach materiałowych zostały przeprowadzone dla bardzo dużych odkształceń. Odkształcenia te były zdecydowanie większe niż największe odkształcenia, jakich można spodziewać się w normalnej pracy koła robota. Można oczekiwać więc, że materiał będzie stabilny co najmniej w granicach wynikających z typowej eksploatacji koła. Do symulacji materiału, z którego została wykonana opona użyto trójparametrowy model Mooneya-Rivlina, którego funkcja gęstości energii odkształcenia wyrażona jest wzorem:

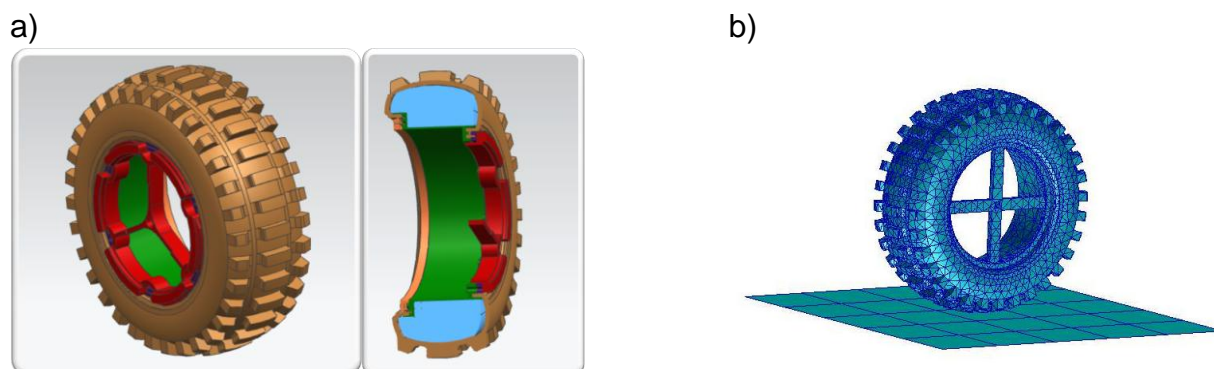
$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^2 \quad (3)$$

Dobrano następujące parametry:

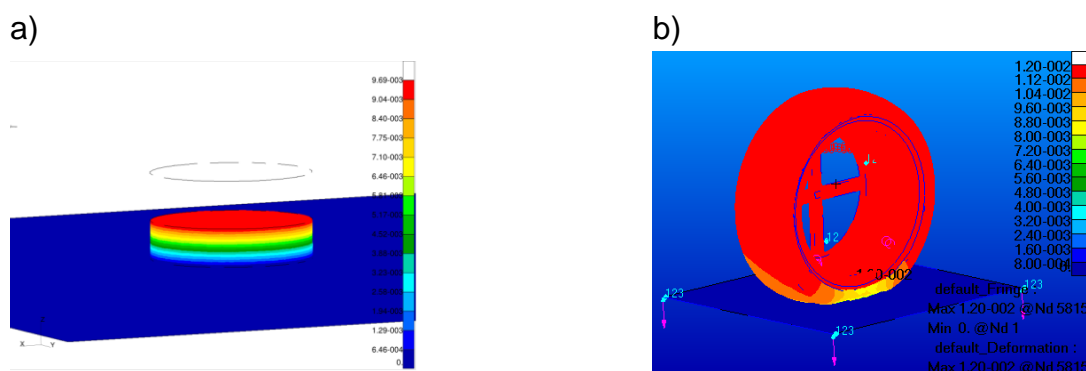
- $C_{10}$             -477 420
- $C_{01}$             941 880
- $C_{11}$             119 530
- $C_{20}$             0
- $C_{30}$             2412

Przed przystąpieniem do analizy z zastosowaniem MES zaimportowano model CAD koła robota (rys. 8a), a następnie utworzono siatkę niezbędną do dalszych analiz (rys. 8b).

W celu weryfikacji poprawności doboru modeli konstytutywnych i ich parametrów wykonano symulacje z użyciem MES (rys. 9a). Następnie przeprowadzono symulacje deformacji poszczególnych części opony, wykorzystując dobrane wcześniej parametry (rys. 9b).

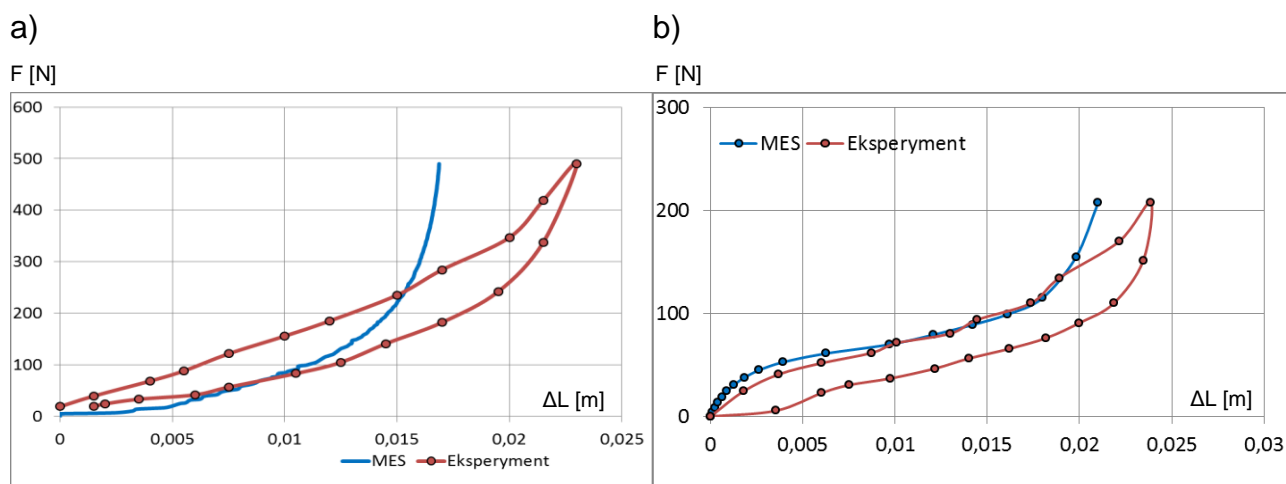


Rys. 8. Koło jezdne robota: a – model CAD, b – siatka zbudowana do analiz z użyciem MES



Rys. 9. Symulacja z użyciem MES dla: a – ściskania próbki wkładu opony, b – obciążania promieniowego wkładu opony

Charakterystyki sztywności dla wkładu i całej opony uzyskane w wyniku badań widoczne są na rys. 10. Z uzyskanych wyników badań symulacyjnych z użyciem MES oraz analogicznych badań doświadczalnych widać dużą zgodność uzyskanych charakterystyk dla wkładu i całej opony dla deformacji promieniowych opony, które mogą wystąpić w typowych warunkach eksploatacji koła. Analizując uzyskane wyniki należy mieć na uwadze niedokładności wynikające z przeprowadzonych badań doświadczalnych. Można się spodziewać, że w przypadku wykonania badań doświadczalnych z użyciem bardziej dokładnych stanowisk pomiarowych można uzyskać zgodność wyników w szerszym zakresie.



Rys. 10. Wyniki badań charakterystyki sztywności dla wkładu i całej opony:  
a – porównanie symulacji MES z wynikami badań doświadczalnych dla wkładu,  
b – porównanie symulacji MES z badaniami doświadczalnymi dla całej opony

#### 4. PODSUMOWANIE, WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Badania symulacyjne dynamiki wirtualnych prototypów robotów z zastosowaniem MES to obiecujący kierunek rozwoju na drodze do skrócenia czasu wdrażania nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Podejście tego typu pozwala na większą swobodę podczas projektowania oraz testowania nowych konstrukcji.

Badanie symulacyjne z użyciem MES opony robota mobilnego jest złożonym problemem ze względu na silną nieliniowość modelu. Nie dość, że materiały, z których wykonana została opona posiadają właściwości nieliniowe to dodatkowo miejsca kontaktów komponentów w zespole podłoże-opona-wkład-felga sprawiają poważne problemy numeryczne.

Niemniej jednak uzyskane wyniki potwierdzają słuszność przyjętej metodyki, według której na podstawie opracowanego modelu CAD opony i znanych parametrów materiałowych można określić sztywność promieniową opony, którą można wykorzystać w badaniach dynamiki wirtualnego prototypu całego robota.

W ramach dalszych prac, przeprowadzane będą symulacje z użyciem MES całości złożenia koła, aż do uzyskania wyników, które będą odzwierciedlały doświadczenia przeprowadzone w rzeczywistości z zadowalającą dokładnością. Warto również przeprowadzić badania próbek materiałowych na profesjonalnej maszynie wytrzymałościowej, która pozwoli uzyskać stabilną pętlę obciążania-odciążania próbek. Będzie można wtedy uwzględnić również efekt Mullinsa. Dodatkowo wykorzystanie dokładniejszej maszyny wytrzymałościowej powinno poprawić dokładność uzyskanych wyników.

*Niniejsza praca została zrealizowana w ramach projektu pt. „Modelowanie dynamiki mobilnego robota czterokołowego i sterowanie jego ruchem nadążnym z ograniczeniem poślizgu kół jezdnych”. Projekt jest finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/B/ST7/02532.*

## LITERATURA

- [1] Dąbek P., Szosland A., Identyfikacja parametrów skrętnych opony niepneumatycznej robota mobilnego, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 2/2011, 495-503.
- [2] Giergiel J., Kurc K., Cyfrowe modelowanie robota z napędem gąsienicowym, *Modelowanie inżynierskie*, 12, 2012, 53-60.
- [3] Pacejka H.B., *Tire and Vehicle Dynamics*, 2nd Edition, SAE International and Elsevier 2005.
- [4] Trojnacki M., Modelowanie i symulacja ruchu mobilnego robota trzykołowego z napędem na przednie koła z uwzględnieniem poślizgu kół jezdnych, *Modelowanie inżynierskie*, tom 10, zeszyt 41, 2011, 411-420.
- [5] Vivekananthan R., Karunamoorthy L., Adaptive Control of Frictional Contact Models for Nonholonomic Wheeled Mobile Robot, *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*, Vol. 5, N° 4, 2011, 30-34.
- [6] <http://www.michelintweel.com/>
- [7] PIAP, Mobile robots for counter-terrorism, <http://www.antiterrorism.eu>, 2013.