

Paweł Baranowski pbaranowski@wat.edu.pl
Jerzy Małachowski jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej,
Wojskowa Akademia Techniczna

EKSPERYMENTALNE ORAZ NUMERYCZNE BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH PRÓBEK OPONY SAMOCHODU TERENOWEGO- ANALIZA PORÓWNAWCZA

Streszczenie: Poniższa praca opisuje poszczególne etapy badań wytrzymałościowych próbek opony samochodu terenowego. Próby jednoosiowego ściskania oraz rozciągania przeprowadzone zostały przy użyciu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej z zastosowaniem szybkiej kamery oraz specjalistycznego oprogramowania do pomiaru odkształceń. Uzyskane krzywe naprężenie-odkształcenie posłużyły do wyznaczenia stałych dla hipersprężystego modelu materiału opisanego konstytutywnym równaniem Mooney'a-Rivlina. W kolejnym etapie badań przeprowadzono numeryczne testy odwziewiedlające próby wykonane w warunkach eksperymentalnych, które pozwoliły zweryfikować poprawność użytych danych materiałowych oraz porównać wyniki z badaniami wytrzymałościowymi.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ASSESSMENT OF TIRE RUBBER COUPONS MECHANICAL CHARACTERISTICS - COMPARISON STUDIES

Abstract: Presented paper shows subsequent stages of off-road vehicle tire coupons mechanical characteristics experimental assessment. Uniaxial compression and tension tests were carried out on the universal strength machine with the assistance of high-speed camera and special software for strains measurements. Obtained stress-strain curves were applied into the FE model of rubber coupon in order to estimate material constants for Mooney-Rivlin constitutive equation defining the material of the tire. In next stage numerical analyses of compression and tension tests were performed, which allowed to validate implemented material characteristics and compare results with experimental ones.

1. WSTĘP

Ze względu na swoje mechaniczne właściwości, m.in. zdolność do odwracalnej deformacji pod działającym obciążeniem, guma i materiały gumo podobne są bardzo popularne w wielu gałęziach przemysłu. Jedną z tych gałęzi jest przemysł motoryzacyjny, gdzie guma stosowana jest głównie do produkcji opon. Ze względu na skomplikowaną konstrukcję opony jej opracowanie (biorąc pod uwagę wysokie wymagania eksploatacyjne) wiąże się z koniecznością przeprowadzenia wielu badań eksperymentalnych, m.in. materiału gumy, [1,2] mających na celu określenie jej trwałości oraz poprawności wykonania. Konsekwencją tego są duże nakłady finansowe i jak i czasowe. Alternatywą dla testów doświadczalnych może być modelowanie numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Dzięki niej istnieje możliwość określenia stanu deformacji i naprężeń występujących w strukturze opony oraz wprowadzenia niezbędnych zmian konstrukcyjnych jeszcze przed fazą produkcji

Poniższa praca przedstawia opis zrealizowanych prób jednoosiowego ściskania oraz rozciągania, którym poddane zostały próbki materiału wycięte z opony samochodu terenowego. Badania przeprowadzone zostały na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej z zastosowaniem szybkiej kamery oraz specjalistycznego oprogramowania do pomiaru odkształceń. Uzyskane krzywe naprężenie-odkształcenie

posłużyły do wyznaczenia stałych dla hipersprężystego modelu materiału opisanego konstytutywnym równaniem Mooney'a-Rivlina. W kolejnym etapie wykonano modele numeryczne próbek użytych w badaniach wytrzymałościowych i przeprowadzono numeryczne testy odzwierciedlające próby wykonane w warunkach eksperymentalnych, które pozwoliły zweryfikować poprawność użytych danych materiałowych oraz porównać wyniki z badaniami wytrzymałościowymi.

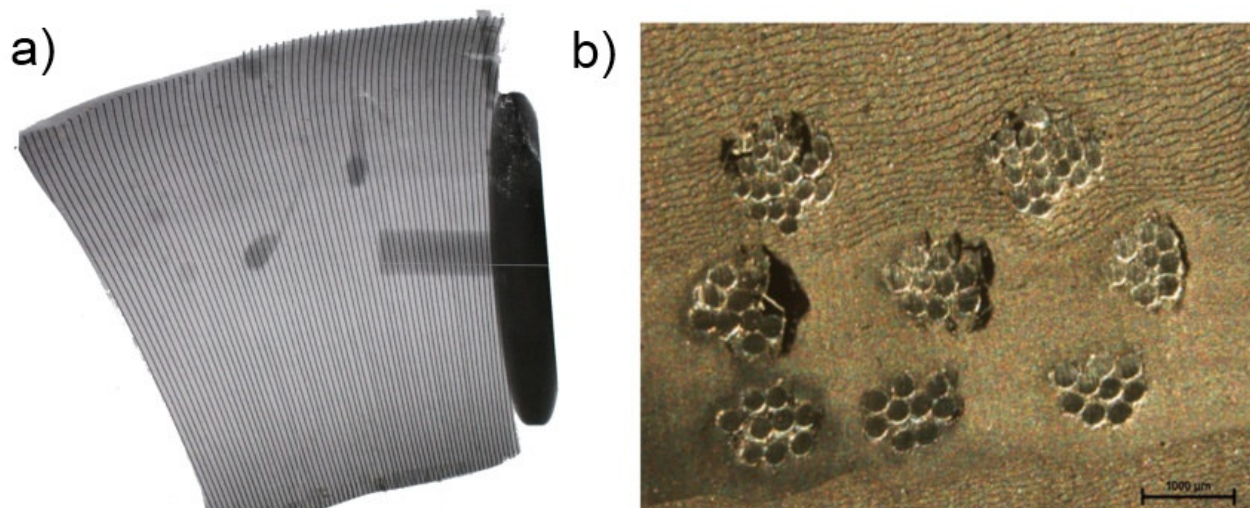
2. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Przed przystąpieniem do realizacji testów jednoosiowego ściskania i rozciągania należało przygotować próbki o geometrii zgodnej z normami PN-54/ C-04253 oraz PN-ISO 37:2007. W pierwszej kolejności wycięto plastry o grubości 3-4 mm, które w kolejnym etapie posłużyły do wykonania próbek wiosełkowych do testów jednoosiowego rozciągania. Plastry te należało wyciąć w sposób, dzięki któremu próbki nie zawierały wzmocnienia w postaci stalowych kordów, gdyż w przeciwnym wypadku uzyskane wyniki z badań nie dałyby wiarygodnych rezultatów. Generalnie, ze względu na strukturę oraz budowę opony wystąpiły pewne ograniczenia:

- z części bieżnikowej możliwe było wykonanie jedynie próbek walcowych o wysokości 17,8 mm oraz średnicy 35 mm (do testów jednoosiowego ściskania).

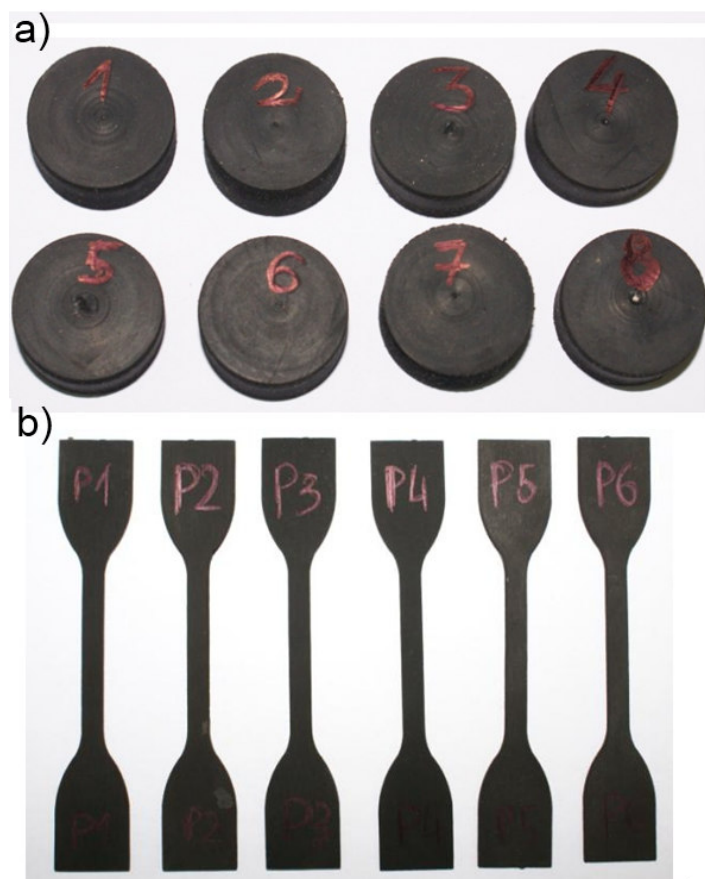
- z części bocznej opony wykonano tylko próbki do testów jednoosiowego rozciągania (o grubości 2 mm oraz odcinku pomiarowym o długości 40 mm).

W celu zweryfikowania układu kordów w strukturze opony wykonano zdjęcia mikroskopowe oraz rentgenowskie (Rys. 1a, Rys. 1b). Cały proces wycinania próbek przeprowadzono z zastosowaniem techniki cięcia wodą.



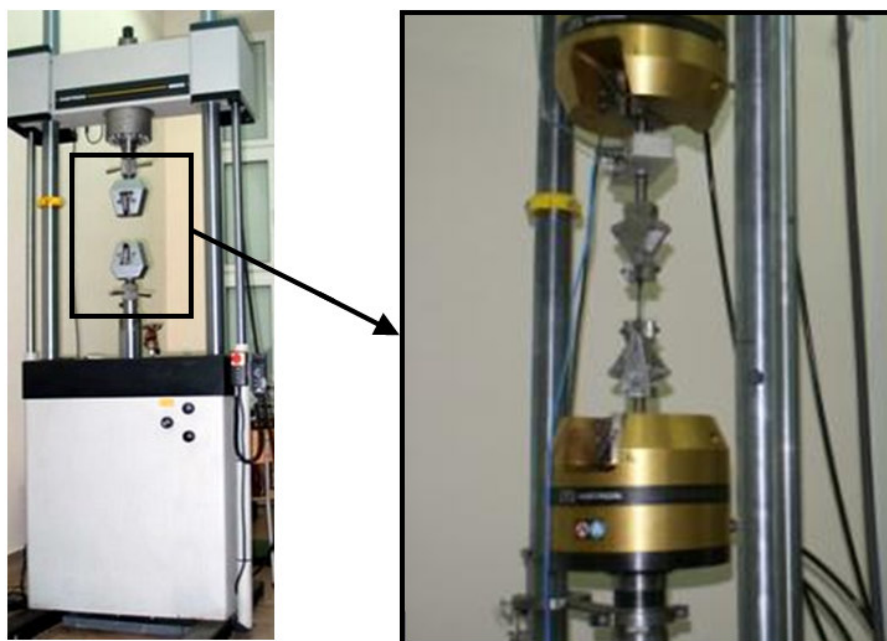
Rys. 1 a) Zdjęcie rentgenowskie stalowych kordów oraz b) zdjęcie mikroskopowe obszaru opony z widoczną budową pojedynczego kordu

W wyniku przeprowadzonych operacji uzyskano 8 próbek walcowych, które posłużyły do wykonania testów jednoosiowego ściskania oraz 6 próbek wiosełkowych to badań statycznego rozciągania (Rys. 2).



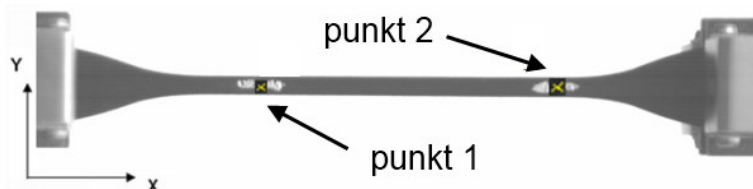
Rys. 2. Próbkki do testów jednoosiowego a) ściskania oraz b) rozciągania

Badania wytrzymałościowe zostały przeprowadzone na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej (Rys. 3) ze wspomaganie szybkiej kamery oraz oprogramowaniem do pomiaru odkształceń.



Rys. 3. Uniwersalna maszyna wytrzymałościowa użyta w badaniach wraz z zamontowaną próbką wioselkową

Jak już wcześniej wspomniano, badania wytrzymałościowe wspomagane były specjalistycznym oprogramowaniem do pomiarów odkształceń metodą śledzenia zmiany położenia punktów. Metoda ta polega na rejestracji przemieszczeń punktów naniesionych na próbkę z dużą częstotliwością na kolejnych klatkach filmu. W kolejnych etapach wyznaczane jest odkształcenie próbki przy zastosowaniu metody korelacji. Punkty pomiarowe na próbkach umieszczane były w dolnej strefie pomiarowej oraz w górnej strefie pomiarowej próbki (Rys. 4).



Rys. 4. Punkty pomiarowe jednej z próbek oraz przyjęty układ współrzędnych

W celu wyznaczenia odkształcenia próbek niezbędnych było zdefiniowanie następujących wielkości:

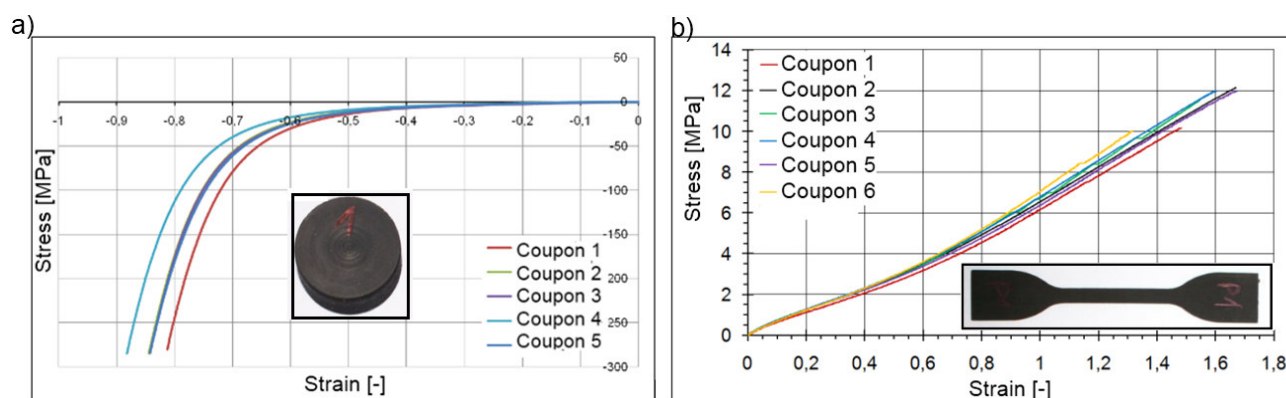
- składowej X_1 (składowa x położenia) i Y_1 (składowa y położenia) dla punktu 1;
- składowej X_2 oraz Y_2 dla punktu 2;
- składowej odległości pomiędzy punktami X_{12} oraz Y_{12} .

Oprogramowanie definiuje wymiar składowych odległości i położenia jako 0,1 piksela. Odkształcenie więc można wyznaczyć z dokładnością do 0,1 piksela/0,1 piksela, ze wzoru:

$$\epsilon_{12} = \frac{X_{12} - X_{12}^0}{X_{12}^0} \quad (1)$$

gdzie: X_{12}^0 – odległość początkowa pomiędzy punktami 1 i 2, X_{12} – odległość pomiędzy punktami 1 i 2 w danej chwili czasowej t .

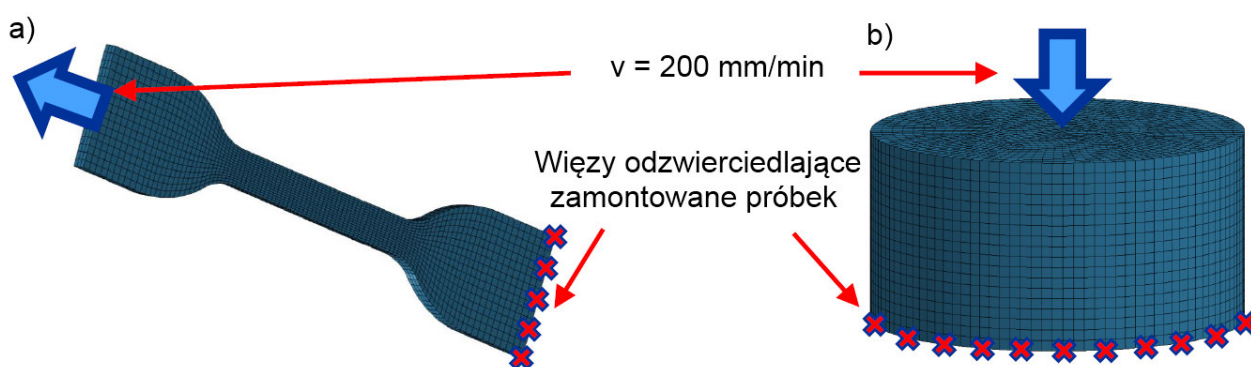
Wartości obliczane przez program były równoległe synchronizowane z wynikami uzyskanymi z maszyny wytrzymałościowej. Efektem przeprowadzonych testów były charakterystyki odkształcenie-naprężenie dla próbek wykonanych z bieżnika oraz z boku opony (Rys. 5).



Rys. 5. a) Krzywe odkształcenie-naprężenie dla testu ściskania, b) Krzywe naprężenie-odkształcenie dla testu rozciągania

3. WARUNKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Na tym etapie badań w pierwszej kolejności należało wykonać modele numeryczne próbek gumy przyjętych do testów rozciągania i ściskania o tych samych wymiarach geometrycznych co w eksperymentach. Do ich budowy użyto bryłowych elementów heksagonalnych z pełną liczbą punktów całkowania (HEX8) [3]. Na próbkę walcową przypadało 1645 elementów powiązanych 1523 węzłami, podczas gdy na próbkę wiosłową przypadało 967 elementów oraz 742 węzłów. Gęstość siatki została dobrana na drodze analiz tak, aby gwarantowała dużą dokładność obliczeń przy optymalnym czasie symulacji. Warunki analizy zostały przyjęte zgodnie z warunkami eksperymentalnymi, tj. prędkość rozciągania oraz ściskania próbek w obydwu przypadkach wynosiła 200 mm/min. Symulacje numeryczne wykonano przy użyciu kodu obliczeniowego Ls-Dyna z bezpośrednią metodą całkowania równań ruchu. Warunki początkowo-brzegowe przedstawione są na rysunku 6.



Rys. 6. Warunki początkowo-brzegowe przyjęte do analiz dla a) próbki rozciąganej oraz b) próbki ściskanej

Opisywaną próbką należało również zdefiniować cechy materiałowe gumy. Materiał ten może odkształcać się sprężysto w dużym zakresie odkształceń sięgających kilkuset procent. Niezbędne w modelowaniu opon relacje konstytutywne dla gumy (związki między naprężeniami a odkształceniami) formułuje się w ramach teorii nieliniowej sprężystości, tzw. hipersprężystości. W związku z tym użyto jednego z dostępnych i często stosowanych modeli opisujących materiały z rodziny hipersprężystych: modelu Mooney-Rivlin'a [4,5,6]. Do opisu tego modelu wykorzystuje się funkcję jednostkowej energii odkształcenia (Funkcja Gęstości Energii Sprężystej) będącej analityczną funkcją tensora odkształcenia [3]:

$$W = A(I_1 - 3) + B(I_2 - 3) + C\left(\frac{1}{I_3} - 1\right) + D(I_3 - 1)^2 \quad (2)$$

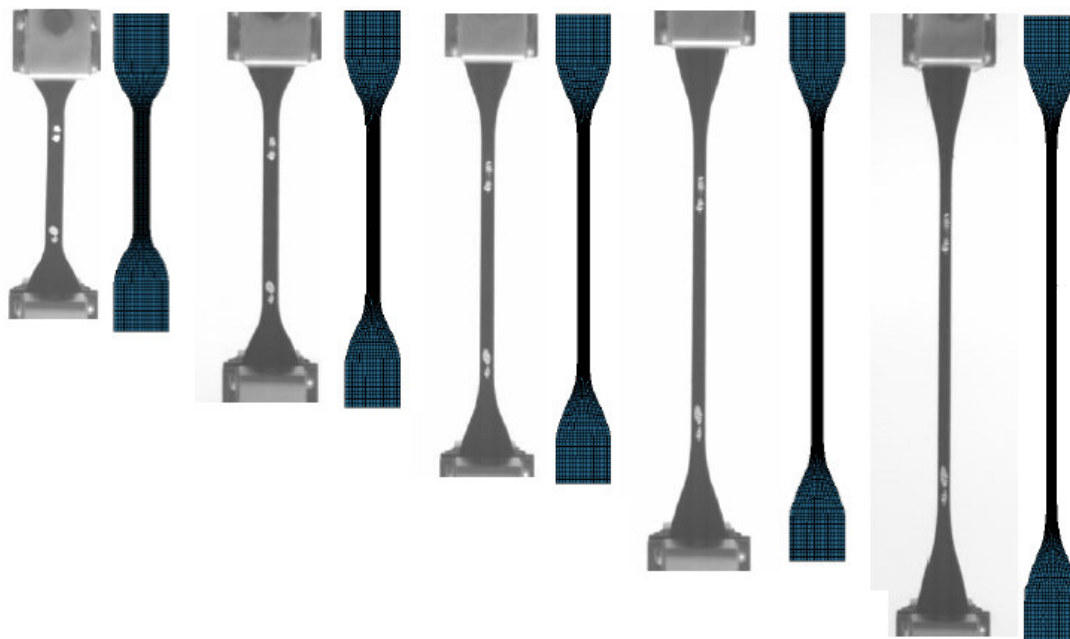
$$C = 0.5A + B \quad (3)$$

$$D = \frac{A(5\nu - 2) + B(11\nu - 5)}{2(1 - 2\nu)} \quad (4)$$

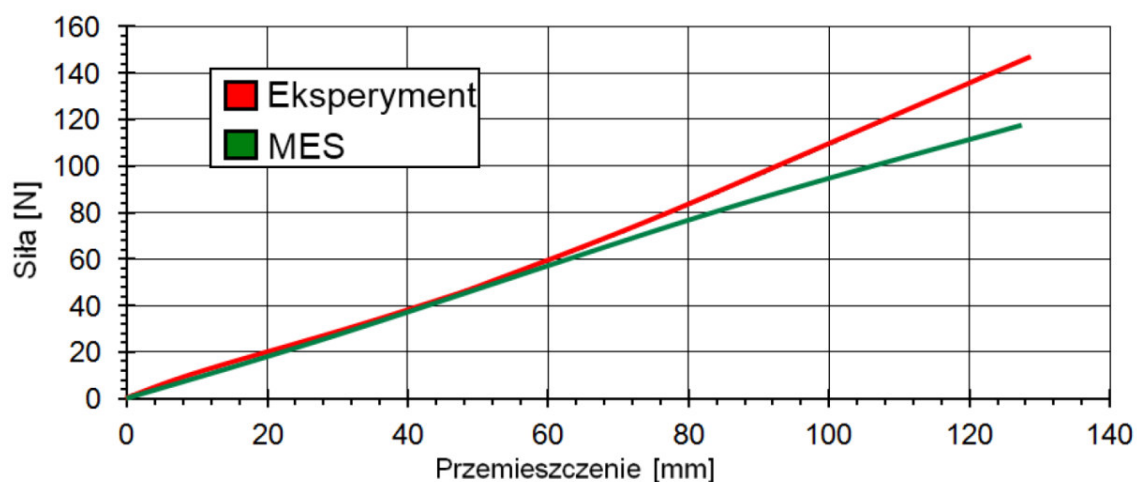
gdzie: A i B - stałe materiałowe, ν - współczynnik Poissona, I_1, I_2, I_3 - niezmienniki tensora deformacji izochorycznej.

4. ANALIZA PORÓWNAWCZA WYNIKÓW

W wyniku przeprowadzonych testów zarówno eksperymentalnych jak i numerycznych otrzymano deformację próbek ściskanych oraz rozciąganych. Na rysunku 7 przedstawione są próbki rozciągane (rzeczywiste i numeryczne) w wybranych chwilach czasowych: od rozpoczęcia próby do momentu zerwania próbki. Zauważalne jest duże podobieństwo w deformacjach obydwu próbek, co również potwierdza wykres siła-przemieszczenie dla obydwu przypadków przedstawiony na rysunku 8.

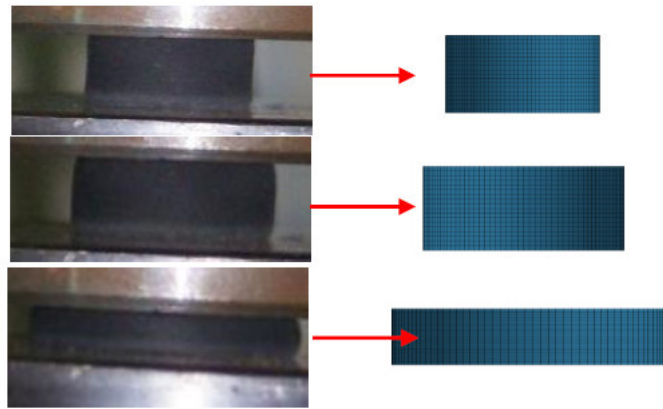


Rys. 7. Porównanie deformacji próbki w testach eksperymentalnych oraz numerycznych od rozpoczęcia próby do momentu zerwania próbki

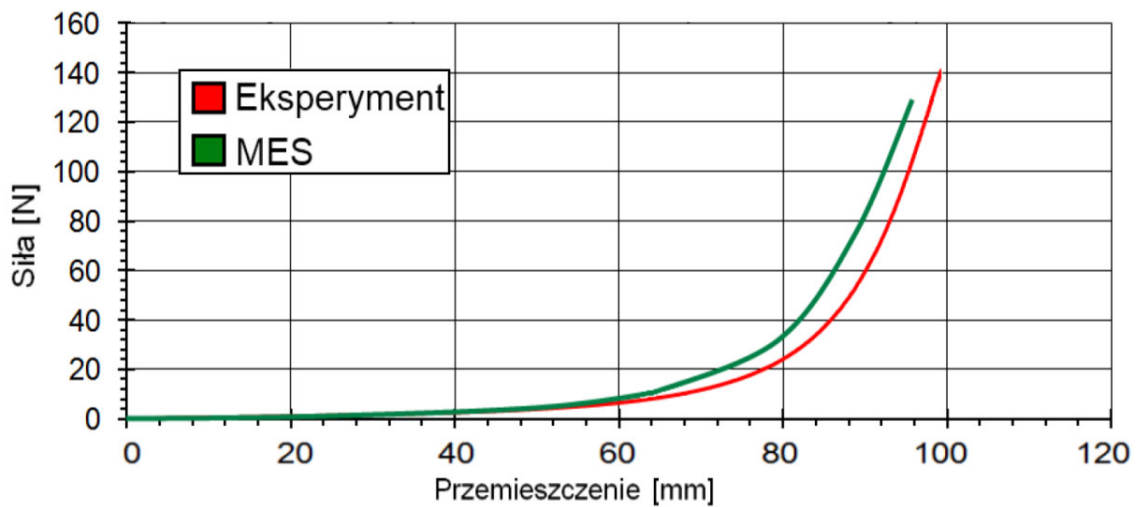


Rys. 8. Wykres porównawczy siła-przemieszczenie dla obydwu przypadków w testach rozciągania

Na rysunku 9 przedstawione są natomiast próbki walcowe (rzeczywiste i numeryczne) w wybranych chwilach czasowych dla testu ściskania. Podobnie jak w poprzednim przypadku zauważalne jest duże podobieństwo w deformacjach obydwu próbek, co również potwierdza wykres siła-przemieszczenie (Rys. 10).



Rys. 9. Porównanie deformacji próbki w testach ściskania (eksperymentalnych oraz numerycznych)



Rys.10. Wykres porównawczy siła-przemieszczenie dla obydwu przypadków w testach ściskania

5. WNIOSKI

Przedstawiona przez autorów praca może być rozpatrywana jako efektywne sprzężenie badań eksperymentalnych z analizami numerycznymi przy użyciu metody elementów skończonych. W wyniku wykorzystania nowoczesnych metod pomiaru odkształceń, tzw. metody optycznej punktów, która wspomaga uniwersalne techniki stosowane w maszynach wytrzymałościowych, możliwe jest uzyskanie niezbędnych wielkości mechanicznych. Zaimplementowanie uzyskanych charakterystyk do konstytutywnych modeli materiałowych stosowanych w analizach pozwala zachować dużą dokładność rozwiązania numerycznego oraz zbieżność z testami eksperymentalnymi, co potwierdzają uzyskane wyniki. W kolejnych etapach badań przeprowadzone zostaną testy wytrzymałościowe materiału gumy oraz kompozytu guma-kord z uwzględnieniem obciążeń dynamicznych. Pozwoli to zbadać wpływ prędkości odkształceń na zachowanie się gumy pod obciążeniem szybkozmiennym, co będzie bardzo istotne w równoległe prowadzonych badaniach koła pojazdu poddanego obciążeniu falą ciśnienia powstałej z eksplozji ładunku wybuchowego.

6. LITERATURA

- [1] Ochelski S. and other, *Influence of hardness on mechanical properties of elastomers*, Journal of KONES, Vol. 17, pp. 317-325, 2010.
- [2] Krawczyk A. and others, *Mechanics of polymer and composite materials*, Science, 1985.
- [3] Hallquist J.O.: LS-Dyna. *Theory manual*, California Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [4] Sokolov S.L., *Calculation of the Stress- Strain State of Pneumatic Tires by the Finite Element Method*, Journal of Machinery Manufacture and Reliability , Vol. 36, no 1, pp. 45-49, 2007.
- [5] Pondel B., Małachowski J., *Numeryczna analiza pracy opony samochodowej*, WAT, Warszawa, 2006.
- [6] Shiraishi M. and other, *Making FEM tire model and applying it for durability simulation*, 6th International LS-Dyna Users conference, Detroit, 2000.