



Analiza budowy kół beciśnieniowych

MARCIN ŻMUDA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Instytut Pojazdów
i Transportu, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, marcin.zmuda@wat.edu.pl

Streszczenie. Koła beciśnieniowe nie są nowym rozwiązaniem. Pierwsze informacje na ich temat ukazywały się przed wynalezieniem opon pneumatycznych. Odpowiednia konstrukcja oraz dobór materiałów elastycznej struktury i opasania współczesnych kół beciśnieniowych mają odwzorować funkcję sprężonego powietrza opony pneumatycznej. Wspomniane elementy składowe koła będą decydowały o charakterze przenoszenia obciążeń. Obecnie dominującą formą elastycznej struktury są pojedyncze szprychy oraz struktura komórkowa zbudowana z wieloboków. Opasanie zawiera co najmniej jedną warstwę wzmocnienia z nierozciągliwego materiału. Liczba warstw wzmocnienia oraz ich ukształtowanie będą wpływać na zachowanie się koła podczas obciążenia.

Słowa kluczowe: inżynieria mechaniczna, koła beciśnieniowe, ogumienie, NPT

DOI: 10.5604/01.3001.0015.6962

1. Wprowadzenie

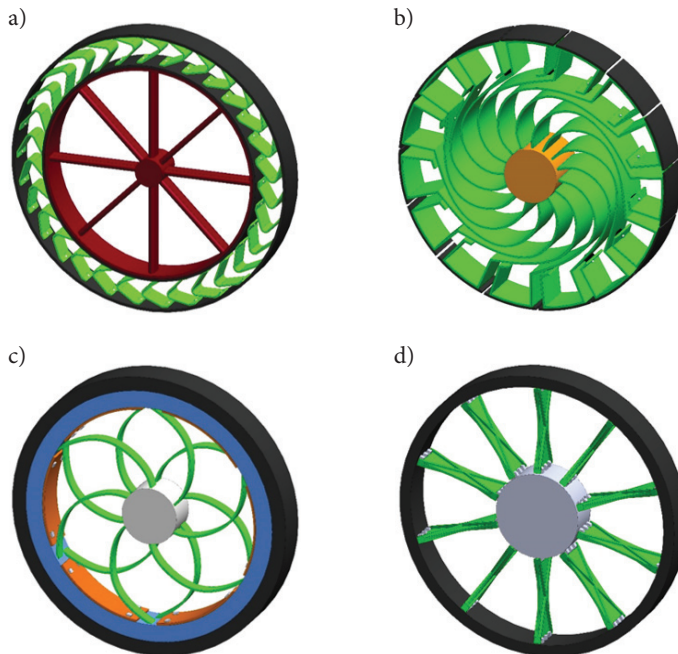
Ogumienie beciśnieniowe to rodzaj ogumienia zapewniającego przenoszenie obciążeń od nawierzchni drogi na pojazd, w tym charakterystykę kierunkową oraz trakcyjną, bez konieczności utrzymywania pod określonym ciśnieniem sprężonego gazu lub płynu [1]. To ogumienie nie jest nowym rozwiązaniem. Było ono rozwijane równoległe z ogumieniem pneumatycznym. Główną jego zaletą jest wyeliminowanie sprężonego powietrza jako „elastycznej poduszki” i w to miejsce wprowadzenie odpowiednio ukształtowanej przestrzennej struktury elastycznej oraz opasania. W literaturze anglojęzycznej tego typu ogumienie najczęściej funkcjonuje jako *non-pneumatic tire* (NPT) lub *airless tire*.

Informacje dotyczące kół beciśnieniowych oraz prób ich komercyjnego zastosowania można znaleźć już w XIX w. Na podstawie przeglądu patentów

opublikowanych głównie przez Urząd Patentowy Stanów Zjednoczonych dokonano analizy rozwiązań konstrukcyjnych kół beczciśnieniowych do 1938 r. [2-23]. Ówczesne koła beczciśnieniowe to konstrukcje jednolite lub dzielone. Właściwości sprężysto-tłumiące kół uzyskiwano przez m.in. promieniowe łączniki wykonane z elastomeru i/lub tkaniny kordowej, zastosowanie stali sprężystej oraz gumową strukturę o odpowiedniej geometrii (rys. 1). W ówczesnych kołach stosowano dostępne w tamtych czasach rodzaje połączeń, tj. połączenia nitowane, śrubowe i wulkanizacje.

Autorzy historycznych konstrukcji kół beczciśnieniowych wskazywali kilka zalet swoich rozwiązań w porównaniu do ówczesnego ogumienia pneumatycznego, m.in.:

- łatwość i szybkość naprawy uszkodzonego koła (naprawa wyłącznie uszkodzonego elementu, np. części bieżnika lub elastycznej szprychy),
- możliwość kontynuowania jazdy mimo częściowego uszkodzenia,
- odporność na uszkodzenia mechaniczne,
- mniejsza masa nieresorowana (ówczesne opony pneumatyczne charakteryzowały się dużymi gabarytami oraz masą),
- współpraca bieżnika z gruntem na całej jego szerokości,
- dłuższy okres eksploatacji.

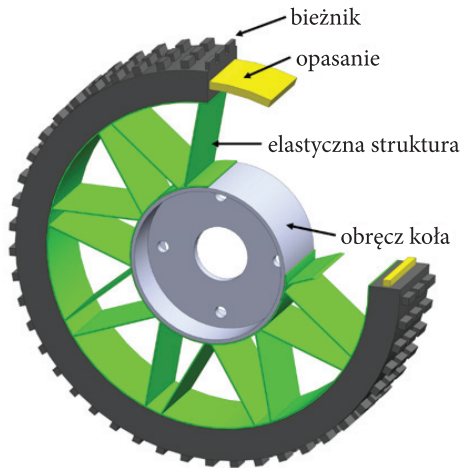


Rys. 1. Przykładowe historyczne rozwiązania kół beczciśnieniowych: a) koło jednolite ze stalowymi elementami sprężystymi, b) koło dzielone ze stalowymi elementami sprężystymi, c) koło jednolite wyposażone w płaskie sprężyny oraz dodatkowe gumowe opasanie, d) koło jednolite z promieniowymi szprychami wykonanymi z gumy [opracowanie własne na podstawie 6, 10, 14, 23]

Zaprezentowane rozwiązania konstrukcyjne, ze względu na ich złożoność oraz różnorodność stosowanych połączeń, nie przetrwały próby czasu. Ustąpiły miejsca dynamicznie doskonalszym rozwiązaniom koła pneumatycznego.

2. Budowa koła beczśnieniowego

W konstrukcji współczesnych kół beczśnieniowych można wyszczególnić następujące elementy składowe [24-36] (rys. 2): obręcz koła, elastyczną strukturę, opasanie, bieżnik.



Rys. 2. Ogólna budowa koła beczśnieniowego [opracowanie własne]

Obręcz ma umożliwić montaż koła na pojeździe. Z uwagi na odmienną konstrukcję kół beczśnieniowych w porównaniu do opon pneumatycznych obręcz koła nie wymaga wykonania dodatkowych przetłoczeń. Spotyka się też rozwiązania koła beczśnieniowego, które wykonane jest na standardowej obręczy koła [37]. Takie rozwiązanie pozwala na zmniejszenie kosztów związanych z wytworzeniem nowej obręczy. Zastosowanie obręczy opon pneumatycznych najczęściej wiąże się z koniecznością usunięcia jej fragmentów (np. obrzeża).

Elastyczna struktura koła beczśnieniowego znajduje się pomiędzy obręczą koła a opasaniem. Może być wykonana w postaci zespołu pojedynczych elastycznych szprych lub w formie komórkowej. Zadania elastycznej struktury to łagodzenie dynamicznego oddziaływania nierówności podłoża na pojazd oraz przenoszenie obciążeń. Elastyczna struktura ma głównie charakter otwarty, tzn. w widoku z boku koła jest widoczna (nieosłonięta) oraz można w niej wykazać puste przestrzenie.

Brak dodatkowej osłony boku koła umożliwia skuteczniejsze odprowadzanie ciepła od nagrzewającej się struktury podczas cyklicznych odkształceń toczzonego koła. Współczynnik wypełnienia struktury elastycznej jest cechą charakterystyczną koła bezciśnieniowego. Został opisany następującą zależnością:

$$c_A = \frac{A_{so}}{A_c}, \quad (1)$$

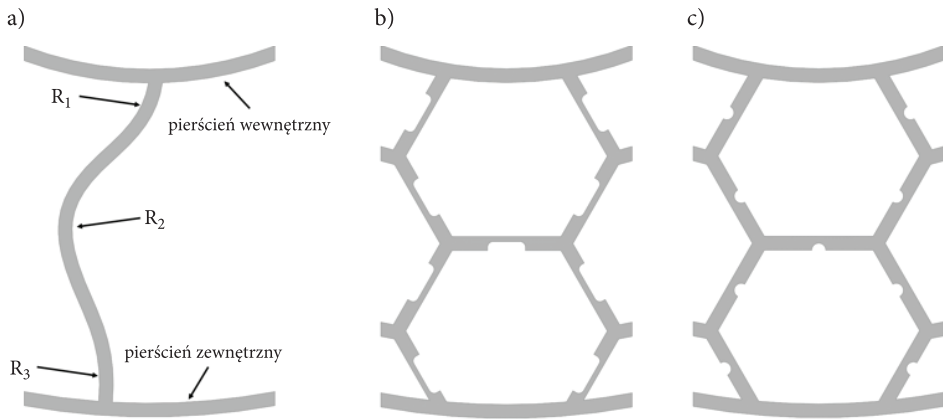
gdzie: c_A — współczynnik wypełnienia elastycznej struktury,
 A_{SO} — pole powierzchni elastycznej struktury otwartej,
 A_C — całkowite pole powierzchni struktury elastycznej.

Podczas promieniowego obciążenia koła bezciśnieniowego odkształceniu ulega zarówno część koła, która styka się z podłożem (dolna część jest ściskana lub ulega wyboczeniu), jak i część przeciwną (górną jest rozciągana). Deformacja dolnej części koła jest znacznie większa niż górnej oraz powoduje wyboczenie szprych struktury elastycznej. Podatność szprych na wyboczenie istotnie wpływa na promieniową sztywność koła oraz jego trwałość. Dlatego kształt szprych oraz przebieg ich odkształcania jest dokładnie określany na etapie projektowania. Satysfakcjonujące rezultaty w konstruowaniu struktury elastycznej koła uzyskano dla szprych o potrójnej krzywiznie (rys. 3a) [38]. Natomiast rozciąganie szprych o pojedynczej krzywiznie skutkowało koncentracją naprężeń w miejscach ich połączenia z zewnętrznym i wewnętrznym pierścieniem. W celu zachowania kołowości opasania należy zastosować odpowiednią liczbę szprych, która jest ograniczona koniecznością zachowania niezbędnego odstępu pomiędzy nimi, aby uniknąć wzajemnego kontaktu (tarcia) [39]. Krzywizna szprychy jest opisywana parametrem jako tzw. nadmiar jej długości [38]:

$$E_L = \left[\left(\frac{L_0}{L_1} \right) - 1 \right] * 100\%, \quad (2)$$

gdzie: E_L — nadmiar długości,
 L_0 — najmniejsza odległość między punktami mocowania szprych,
 L_1 — długość nieodkształconej szprychy.

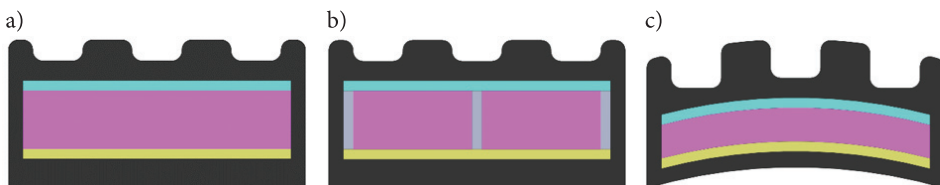
Elastyczna struktura może również występować w formie komórkowej. Poszczególne komórki określone są przez wieloboki, których układ powtarza się na obwodzie koła. W kierunku promieniowym wieloboki będą tworzyć kolejne warstwy. Jej podatność na wyboczenie uzyskuje się poprzez odpowiednią krzywiznę, niesymetryczny kształt lub wyżłobienia ścian bocznych komórki (rys. 3b, c). Struktura elastyczna może być wykonana z jednego rodzaju materiału (najczęściej elastomeru) lub może być wzmocniona tkaniną kordową [40-42].



Rys. 3. Struktura elastyczna: a) szprychowa o potrójnej krzywiznie, b) komórkowa o niesymetrycznym kształcie, c) komórkowa z wyłobieniami [opracowanie własne na podstawie 39, 40]

Istotną zaletą koła beczśniennego o strukturze elastycznej komórkowej to mniejszy poziom generowanego hałasu. Jest to efekt mniejszych odkształceń ścian „komórek” w porównaniu do struktury ze szprychami [40, 41].

Opasanie wraz z bieżnikiem to element koła beczśniennego bezpośrednio stykający się z podłożem. Materiał opasania ma zapewniać odpowiednią podatność na deformację przy pokonywaniu przeszkód (podatność na zginanie), ale jednocześnie właściwą wytrzymałość i trwałość [38]. Dlatego opasanie zbudowane jest co najmniej z jednej warstwy wzmocnienia wykonanego z nierozciągliwego materiału. Warstwa wzmocnienia może być wykonywana z materiałów wykorzystywanych jako osnowa opon pneumatycznych [43]. Wzmocnienie opasania ma zapewnić nierozciągliwość obwodową oraz zwiększyć ogólną sztywność koła [38]. Przy zastosowaniu większej liczby warstw wzmocnienia wprowadza się w budowie koła dodatkowy materiał pomiędzy poszczególnymi warstwami nazywany rdzeniem. Rysunek 4 jest przekrojem poprzecznym opasania wraz z bieżnikiem oraz przedstawia przykładowe wykonania jednolitego rdzenia. Kolorem różowym zaznaczono warstwę jednolitego rdzenia. Kolorami błękitnym, żółtym oraz szarym zaznaczono poszczególne warstwy wzmocnienia.



Rys. 4. Ukształtowanie wzmocnienia oraz jednolitego rdzenia w przekroju poprzecznym opasaniem z bieżnikiem: a) pojedyncze równoległe warstwy wzmocnienia, b) kilka warstw wzmocnienia usytuowanych prostopadłe względem siebie, c) łukowe warstwy wzmocnienia [opracowanie własne na podstawie 44, 45]

Łukowe ukształtowanie warstw wzmocnienia (rys. 4c) pozwala na zmniejszenie oporów w ruchu krzywoliniowym oraz może wpłynąć na przyspieszone zużycie bieżnika z uwagi na różnicę promieni tocnych środka oraz krawędzi śladu styku koła z podłożem (podczas ruchu prostoliniowego).

Podczas obciążania koła siłą normalną opasanie ulega wywłaszczeniu, a rdzeń poddawany jest naprężeniom ścinającym, które są wynikiem względnego przemieszczenia warstw wzmocnienia [44]. Odkształcenie w strefie styku koła z podłożem może powodować wyboczenie opasania, co niekorzystnie wpłynie na równomierność rozkładu nacisków. W celu przeciwdziałania wyboczeniu opasania można zastosować warstwy wzmocnienia o krzywoliniowym przekroju poprzecznym [44]. Wymiary opasania oraz koła bezciśnieniowego, a także rodzaj materiału, z którego wykonany jest jednolity rdzeń, będą wpływać na wartość średnich nacisków w strefie styku [46]:

$$p \cong \frac{Gh}{R}, \quad (3)$$

gdzie: p — wartość średniego nacisku w strefie styku,
 G — moduł ścinania elastomerowej warstwy rdzenia,
 h — grubość warstwy rdzenia opasania,
 R — promień zewnętrznej warstwy wzmocnienia.

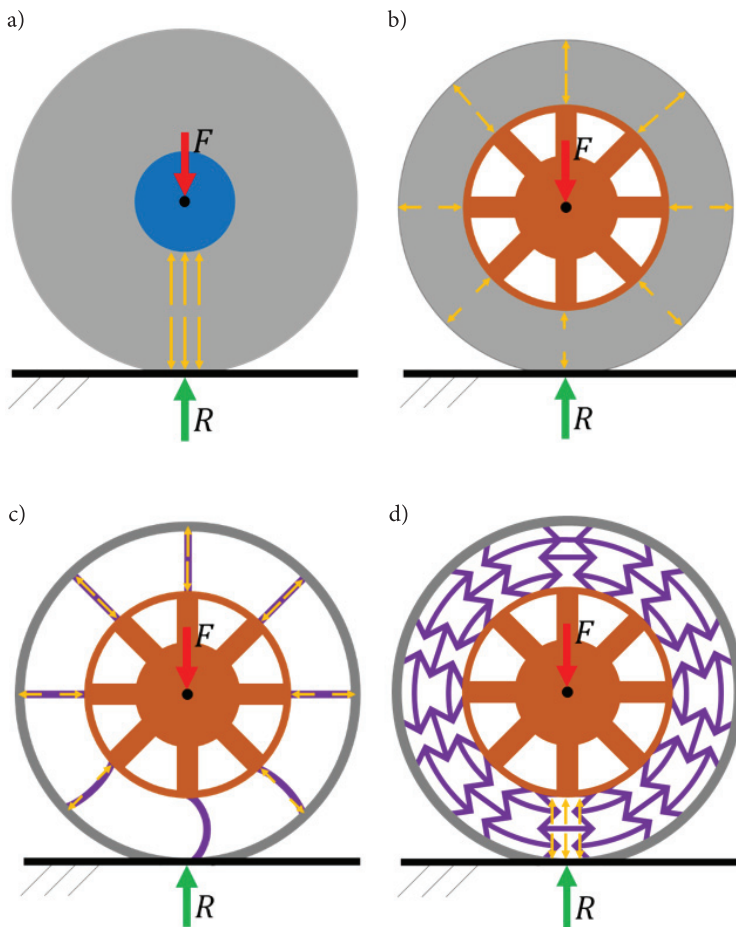
Promień zewnętrznej warstwy wzmocnienia można w pewnym przybliżeniu przyjąć jako zewnętrzny promień koła. Wartość średniego nacisku koła na podłoże określana jest na etapie projektowania koła przy ustalonym materiale warstwy rdzenia oraz przyjętych wymiarach opasania oraz koła. Warto również zwrócić uwagę, że iloczyn nacisków jednostkowych w strefie styku i promienia zewnętrznego koła jest równy iloczynowi grubości warstwy opasania oraz modułu ścinania dla materiału rdzenia. Przedstawiona zależność stanowi kryterium projektowe, ponieważ pozwala na kształtowanie wymiarów geometrycznych, nacisków jednostkowych koła bezciśnieniowego oraz umożliwia dobór właściwego materiału jednolitego rdzenia.

3. Mechanizm przenoszenia obciążeń przez koło bezciśnieniowe

Analizie poddano sposób przenoszenia obciążeń normalnych przez nieruchome koło. W zależności od rodzaju koła (tzw. pełne, pneumatyczne, bezciśnieniowe) inny jest mechanizm przenoszenia obciążeń przez jego konstrukcję [38, 39, 41, 44] (rys. 5):

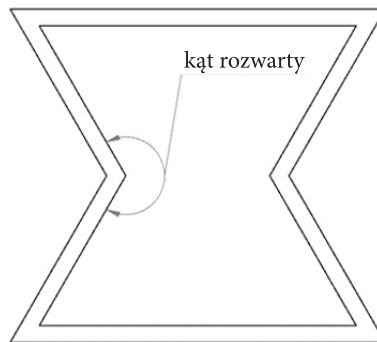
- koło pełne — obciążenie normalne przenoszone jest tylko przez tę część koła, która znajduje się pomiędzy powierzchnią styku a osią koła (charakter przenoszenia obciążeń typu *bottom loader*);

- opona pneumatyczna — obciążenie normalne przenoszone jest przede wszystkim przez sprężone powietrze, które powoduje naprężenie nici osnowy;
- koło beczśnieniowe:
 - koło typu *top loader* — obciążenie normalne przenoszone jest głównie przez część koła (opasanie + struktura elastyczna) znajdującą się poza strefą styku (naśladowanie mechanizmu przenoszenia obciążeń opony pneumatycznej),
 - koło typu *bottom loader* — obciążenie normalne przenoszone jest głównie przez część koła (strukturę elastyczną) znajdującą się pod osią (analogicznie do koła pełnego).



Rys. 5. Mechanizm przenoszenia obciążeń: a) koło sztywne, b) opona pneumatyczna – napięcie nici kordowych, c) koło beczśnieniowe *top loader*, d) koło beczśnieniowe *bottom loader* [opracowanie własne na podstawie 46, 49]

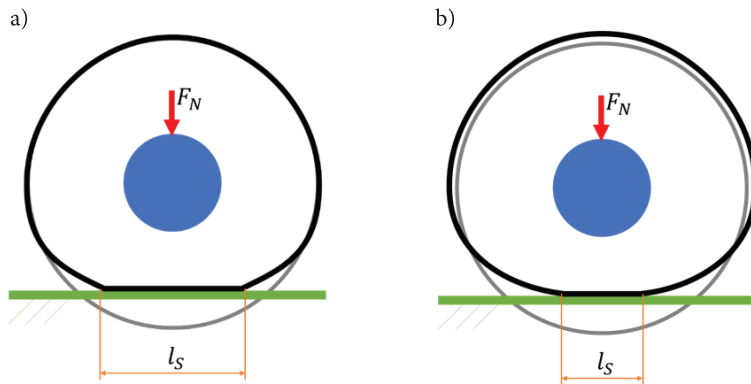
Koło beźciśnieniowe przenosi obciążenie przez elastyczną strukturę i opasanie. Opasanie w kole beźciśnieniowym pod działaniem obciążenia normalnego zachowuje się jak łuk strzelniczy. Podczas obciążania siłą normalną część opasania magazynuje energie mechaniczną [39]. Struktura elastyczna kół beźciśnieniowych również bierze udział w mechanizmie przenoszenia obciążeń normalnych, lecz mechanizm ich przenoszenia zależy od budowy samej struktury. W przypadku kół wyposażonych w pojedyncze szprychy obciążenie przenoszą rozciągane szprychy znajdujące się poza strefą styku koła z podłożem. Szprychy w obrębie styku koła z podłożem ulegają wyboczeniu. Koła posiadające elastyczną strukturę w postaci komórkowej przenoszą obciążenia poprzez jej ściskanie pod osią koła i rozciąganie (w przypadku części niewspółpracującej z podłożem) [38, 40, 46]. Przy czym koło beźciśnieniowe, którego struktura nośna zbudowana jest z wieloboków o kątach ostrych, przenosi obciążenia głównie przez górną (nieodkształconą) część koła, tj. poprzez rozciąganie struktury elastycznej poza strefą styku [41]. Koła beźciśnieniowe wyposażone w strukturę komórkową auksetyczną przenoszą obciążenia głównie przez strukturę komórkową pod osią koła. Struktury auksetyczne charakteryzują się ujemnym współczynnikiem Poissona. Podczas ściskania auksetyki „zmniejszają się” w co najmniej jednym kierunku prostopadłym do kierunku działania siły ścisniającej. Odwrotne zachowanie się struktur można zaobserwować podczas rozciągania, tj. struktury powiększają swoje wymiary w kierunku prostopadłym do działania siły [47, 48]. Struktury mogą być również określane jako *re-entrant*. Przykład pojedynczej komórki struktury auksetycznej przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Pojedyncza komórka struktury auksetycznej [opracowanie własne na podstawie 47]

Wypłaszczenie opasania w strefie styku wpływa na odkształcenie pozostałej jego części. Wynika to z tego, że jest ono nierozciągliwe dzięki wzmocnieniu. Zakres odkształceń niewypłaszczonej części opasania uzależniony jest od odporności na rozciąganie struktury elastycznej, która ma na celu zachowanie kształtu koła. Mechanizm zostanie opisany dla koła ze szprychową strukturą elastyczną. Szprychy poza

strefą styku koła z podłożem są rozciągane. W zależności od odporności szprych na rozciąganie (sprężystości) można kształtować długość śladu styku, co przedstawiono na rysunku 7. Wysoka odporność na rozciąganie będzie przeciwdziałać obwodowemu odkształceniu opasania, powodując dłuższy ślad styku. Szprychy o małej odporności (sprężystości) na rozciąganie umożliwią obwodowe odkształcenia opasania, skracając tym samym długość śladu styku [46]. Szerokość śladu styku wynika głównie z szerokości koła beczciśnieniowego.



Rys. 7. Kształtowanie długości śladu styku poprzez odporność szprych na rozciąganie: a) szprychy o dużej sprężystości, b) szprychy o małej sprężystości [opracowanie własne na podstawie 46]

5. Podsumowanie

Współczesne koła beczciśnieniowe stanowią istotny element procesu doskonalenia konstrukcji i rozwoju ogumienia. Funkcja sprężonego powietrza opon pneumatycznych została odwzorowana za pomocą doboru materiałów i wymiarów geometrycznych opasania oraz struktury elastycznej. Zastąpienie sprężonego powietrza strukturą nośną pozwala na wykorzystanie kół w trudnych warunkach terenowych, gdzie są one narażone m.in. na rozcięcia lub przebicia. Odporność na uszkodzenia mechaniczne przekłada się w pewnym stopniu na ich bezobsługowość. Współcześnie dominującymi rodzajami struktury elastycznej kół beczciśnieniowych są pojedyncze szprychy oraz komórki (wieloboki) ułożone warstwowo. Jeżeli struktura elastyczna nie została wyposażona w osłony boczne, jest określana jako typ struktury otwartej. Jedną z jej zalet jest większa skuteczność w odprowadzaniu ciepła powstałego wskutek cyklicznego odkształcania koła podczas toczenia w porównaniu do struktury zamkniętej. Obciążenie normalne koła beczciśnieniowego przenoszone jest przez opasanie oraz strukturę elastyczną. Zasada działania opasania jest podobna

do łuku strzelniczego, tj. podczas obciążenia siłą normalną magazynuje energię mechaniczną. Obciążenie powoduje wyboczenie szprych w strefie pod osią koła a powierzchnią styku oraz ich rozciągnięcie w pozostałej części struktury elastycznej. Rozciągane szprychy będą brały udział w przenoszeniu obciążenia normalnego. Elastyczna struktura komórkowa w zależności od ukształtowania jej geometrii będzie przenosić obciążenia normalne przez rozciągane lub ściskane wieloboki. Zaletą struktury komórkowej jest mniejszy hałas podczas toczenia koła, z uwagi na mniejsze odkształcenia elastycznej struktury.

Praca została sfinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 884/2021.

Artykuł wpłynął do redakcji 27.10.2021. Zatwierdzono do publikacji 13.11.2021.

Marcin Żmuda <https://orcid.org/0000-0002-4990-6378>

LITERATURA

- [1] § 571.129 Standard No. 129, *New non-pneumatic tires for passenger cars*, National Highway Traffic Safety Admin., DOT. 49 CFR Ch. V (10–1–13 Edition), <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2011-title49-vol6/pdf/CFR-2011-title49-vol6-sec571-129.pdf>, [dostęp: 21.10.2021].
- [2] MAYHEW E.P., *Airless Tire For Automobiles*, nr 1251077, 25.12.1917, United States Patent Office, <https://www.google.pl/patents/US1251077?dq=1,251,077&hl=pl&sa=X&ved=0ahUKEwixjWV2v7RAhVmYZoKHRWzDNYQ6AEIGjAA>, [dostęp: 22.10.2021].
- [3] HAWKS H.S., *Airless Tire*, nr 1281364, 15.10.1918 r., United States Patent Office, <https://www.google.pl/patents/US1281364?dq=1,281,364&hl=pl&sa=X&ved=0ahUKEwifwYKki5LSAhXnBZoKHS1fA-gQ6AEIJTAB>, [dostęp: 22.10.2021].
- [4] Light C.H., *Airless Tire*, nr 1388350, 23.08.1921 r., United States Patent Office, <https://patents.google.com/patent/US1388350A/en?q=claus+h&q=light&q=airless+tire>, [dostęp: 22.10.2021].
- [5] *Rubber spokes give bounce to airless safety tire*, Popular Science Monthly, May 1938. <https://books.google.com.au/books?id=tSgDAAAAMBAJ&printsec=frontcover&hl=pl>, [dostęp: 22.10.2021].
- [6] MARTIN J.V., *Aero and Auto Tire*, nr 2050352, 11.08.1936 r., <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US2050352.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [7] MARTIN J.V., *Elastic Tire*, nr 2016095, 01.10.1935, United States Patent Office, <https://patents.google.com/patent/US2016095>, [dostęp: 22.10.2021].
- [8] LAMBERT H.M., *Cushion Tire for Vehicle Wheels*, nr 1225042, 08.05.1917, United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/8c/d9/6b/1dddc26c8e692/US1225042.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [9] LAMBERT H.M., *Cushion Tire for Vehicle Wheels*, nr 1268078, 28.05.1918, United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/12/26/b7/e03242ddb1d82e/US1268078.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [10] MARLEY B., THACKER W.P., BARNARD R.P., *Resilient Wheel*, nr 1050481, 14.01.1913 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/21/22/ea/3db78546607ee1/US1050481.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [11] MATHIESEN M., *Resilient Wheel*, nr 1037949, 10.09.1912, United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/c6/5d/d8/6d3ae0f60fb285/US1037949.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].

- [12] WAYNE H.N., *Resilient Wheel*, nr 1639827, 23.08.1927 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/c7/e5/af/6b96f810cd1534/US1639827.pdf>, dostęp dnia 22.10.2021 r.
- [13] YANKAUER S., *Resilient Wheel*, nr 1459565, 19.06.1923 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/f0/f3/ae/6caee1fd12ca4a/US1459565.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [14] BESLER W., *Resilient Wheel*, nr 987340, 21.03.1911 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/4e/33/af/473a4946e10176/US987340.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [15] SALLAC H.C., *Resilient Wheel*, nr 1614397, 11.01.1927 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/4b/9e/e1/6526575e334ae5/US1614397.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [16] MINNICK G.D., *Resilient Wheel*, nr 1060480, 29.04.1913 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/47/d7/ce/6df7d205077fed/US1060480.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [17] HALLETT T.S., *Resilient Vehicle Wheel*, nr 1461483, 10.07.1923 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/df/f1/06/6d81b8449a4067/US1461483.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [18] LINCOLN I., *Resilient Wheel*, nr 1450671, 03.04.1923 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/9a/89/a8/7d8f70e6cf8578/US1450671.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [19] PERCY H.C., *Resilient Wheel*, nr 1085700, 03.02.1914 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/a9/c6/5f/1a42028b7be8ae/US1085700.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [20] BENNETT M.E., *Spring or Resilient Wheel*, nr 1948412, 20.02.1934 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/92/2a/da/31766c4bbffdd8/US1948412.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [21] HAVENS E.A., *Resilient Wheel*, nr 1493199, 06.05.1924 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/f4/3e/6a/1b7ec2fa2c579f/US1493199.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [22] SCHULZ J.E., *Resilient Wheel*, nr 1543728, 30.06.1925 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/9a/bb/53/beb2dee1de3e77/US1543728.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [23] IMMKE H.W., *Resilient Wheel*, nr 1177628, 04.04.1916 r., United States Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/a0/36/3e/1e61981f1e5597/US1177628.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [24] DU X., ZHAO Y., WANG Q., FU H., LIN F., *Grounding characteristics of a non-pneumatic mechanical elastic tire in a rolling state with a camber angle*, Stroj Vestnik/Journal Mech Eng., 5, 2019, 287-29.
- [25] JU J., VEERAMURTHY M., SUMMERS J. D., THOMPSON L., *Rolling resistance of a nonpneumatic tire having a porous elastomer composite shear band*, Tire Sci. Technol., 41, 3, 2013, 154-173. .
- [26] KIM K., HEO H., UDDIN M.S., JU J., KIM D.M., *Optimization of Nonpneumatic Tire with Hexagonal Lattice Spokes for Reducing Rolling Resistance*, SAE Tech. Pap., vol. 2015, April, SAE International, 2015.
- [27] KIM K., KIM D.M., JU J., *Static Contact Behaviors of a Non-Pneumatic Tire with Hexagonal Lattice Spokes*, SAE International Journal Passenger Cars - Mech. Syst., 6, 3, 2013, 1518-1527.
- [28] RHYNE T.B., CRON S.M., *Development of a non-pneumatic wheel*, Tire Sci. Technol., 34, 3, 2006, 150-169.
- [29] RUGSAJ R., SUVANJUMRAT C., *Proper Radial Spokes of Non-Pneumatic Tire for Vertical Load Supporting by Finite Element Analysis*, International Journal of Automotive Technology, 20, 4, 2019, 801-812.
- [30] JACKOWSKI J., ŻMUDA M., *Ogumienie pojazdów wojskowych – wybrane zagadnienia*, [w:] J. Kończak, Z. Ciekot (red.), *Konstrukcja, eksploatacja, osłona balistyczna pojazdów oraz technologie*, WITPiS, Warszawa 2018.

- [31] JACKOWSKI J., ŻMUDA M., *Tendencje rozwojowe ogumienia – współczesne i przyszłe rozwiązania*, [w:] S. Budek (red.), *Służba czołgowo-samochodowa na przestrzeni 10 lat funkcjonowania Inspektoratu Wsparcia Sił Zbrojnych*, Bydgoszcz 2016.
- [32] JACKOWSKI J., WIECZOREK M., ŻMUDA M., *Analysis of static radial stiffness of the non-pneumatic tire and the pneumatic tire*, Proceedings of 21st International Scientific Conference, Transport Means 2017.
- [33] JACKOWSKI J., WIECZOREK M., ŻMUDA M., *Energy consumption estimation of non-pneumatic tire and pneumatic tire during rolling*, Journal of KONES, 25, 1, 2018.
- [34] ŻMUDA M., JACKOWSKI J., HRYCIÓW Z., *Numerical research of selected features of the non-pneumatic tire*, AIP Conference Proceedings, 2078, 2019.
- [35] HRYCIÓW Z., JACKOWSKI J., ŻMUDA M., *The Influence of Non-Pneumatic Tyre Structure on its Operational Properties*, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 17, 3, 2020.
- [36] JACKOWSKI J., ŻMUDA M., WIECZOREK M., ZUSKA A., *Quasi-Static Research of ATV/UTV Non-Pneumatic Tires*, Energies 2021, 14, 6557.
- [37] MAZUR V., *Experimental research in automobile non-pneumatic tire force heterogeneity*, MATEC Web of Conferences., 224. 02019. 2018.
- [38] CRON S.M., *Variable Stiffness Spoke for a Non-Pneumatic Assembly*, EP2066502B1, 27.03.2008 r., European Patent Office, <https://patentimages.storage.googleapis.com/96/84/79/b3154656ab3c09/WO2008036789A2.pdf>, [dostęp: 22.10.2021].
- [39] RHYNE T.B., CRON S.M., POMPIER J.P., *Compliant Wheel*, US 7013939B2, 03.05.2006 r., United States Patent, <https://patents.google.com/patent/US7013939B2/en?q=US+7013939B2>, [dostęp: 22.10.2021].
- [40] MANESH A. et. al., *Tension-Based Non-Pneumatic Tire*, US 8176957 B2, 15.05.2012 r., United States Patent, <https://patents.google.com/patent/US8176957B2/en?q=US+8176957+B2>, [dostęp: 22.10.2021].
- [41] MANESH A. et. al., *Tension-Based Non-Pneumatic Tire*, US 8104524 B2, 31.01.2012 r., United States Patent, <https://patents.google.com/patent/US8104524B2/en?q=US+8104524+B2>, [dostęp: 22.10.2021].
- [42] WILLIAMS T.L. W., ROGERS E.C., *Non-pneumatic tire and wheel assembly*, EP 2418099A2, 27.06.2011 r., European Patent Application, <https://patents.google.com/patent/EP2418099A2/de?q=EP+2418099A2>, [dostęp: 22.10.2021].
- [43] THOMPSON R.H., *Shear Band*, US 2010/0018621 A1, 28.01.2010 r., United States Patent, <https://patents.google.com/patent/US20100018621A1/en?q=US+2010%2f0018621+A1>, [dostęp: 22.10.2021].
- [44] RHYNE T.B., DEMINO K.W., CRON S.M., *Structurally Supported Resilient Tire*, 03.02.2004 r., US 6769465B2, United States Patent, <https://patents.google.com/patent/US6769465B2/en?q=US+6769465B2>, [dostęp: 22.10.2021].
- [45] MANESH A. et. al., *Tension-Based Non-Pneumatic Tire*, US 8109308 B2, 07.02.2012 r., United States Patent, <https://patents.google.com/patent/US8109308B2/en?q=US+8109308+B2>, [dostęp: 22.10.2021].
- [46] RHYNE T.B., CRON S.M., *Development of a non-pneumatic wheel*, Tire Sci. Technol., 34, 3, 2006, 150-169.
- [47] MASŁOWSKA-LIPOWICZ I., WYRĘBSKA Ł., SZALEK B., OLSZEWSKI P., GAJEWSKI R., *Materiały auksetyczne – struktury, potencjalne zastosowanie*, Technologia i Jakość Wyrobów, 65, 2020.

- [48] IDCZAK E., STRĘK T., *Badania dynamiczne struktur kompozytowych z rdzeniem o właściwościach auksetycznych*, XIV Konferencja Naukowo-Techniczna Techniki Komputerowe w Inżynierii, WAT 2016.
- [49] CHOI S.J. et al., *Non-Pneumatic Tire with Reinforcing Member Having Plate Wire Structure*, US 2014/0238561 A1, 28.08.2014 r., United States Patent, <https://patents.google.com/patent/US20140238561A1/en?q=US+2014%2f0238561+A1>, [dostęp: 22.10.2021].

M. ŻMUDA

Construction analysis of non-pneumatic tires

Abstract. Non-pneumatic tires are not a new construction. The first information about them appeared before the invention of pneu-matic tires. Appropriate materials and design for flexible structure and band of modern non-pressure wheels are designed to mimic the functions of compressed air of a pneumatic tire. Mentioning the elements of the wheel structure will determine the nature of the load carrying. Mentioning the elements of the wheel structure will determine the nature of the load transfer. Currently, the dominant form of flexible structure are: single spokes and a cellular structure made of polygons. The band comprises at least one reinforcement layer of inextensible material. The number of reinforcement layers and their shape will influence the behaviour of the wheel during loading.

Keywords: mechanical engineering, non-pneumatic tire, wheel

DOI: 10.5604/01.3001.0015.6962

