

The use of carbon composites in the construction of eco-vehicle wheels

Wykorzystanie kompozytów węglowych w budowie kół ekopojazdu

KRZYSZTOF OCHALEK*
PATRYK MROZOWSKI
ANNA OCHALEK
MATEUSZ KRZYSIK

ORCID: 0000-0002-5301-2772

Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Krośnie, Rynek 1, 38-400 Krosno

*e-mail: krzysztof.ochalek@pans.krosno.pl

Composite materials are characterized by high strength and Young's modulus reaching several hundred GPa. In structures where mass and stiffness play a major role, they are successfully finding wider and wider application. This paper describes the process of creating composite carbon wheels for a vehicle competing in the Shell Eco-marathon competition. Issues related to the aerodynamics of the wheels and the forces acting on them were analyzed, and then a modular system was designed that would allow for easy, quick and non-invasive replacement of the bearings. Due to the individual production, the wheels were made using the vacuum method and the individual elements were connected together as a glued element. Experimental studies have shown that the obtained carbon wheel was characterized by significantly higher stiffness, lower radial and axial run-out.

Keywords: energy-saving vehicle, stiffness of composites, carbon laminates, composites strength

Materiały kompozytowe charakteryzują się wysoką wytrzymałością oraz modułem Younga sięgającym kilkuset GPa. Z powodzeniem znajdują one coraz szersze zastosowanie w konstrukcjach, gdzie dużą rolę odgrywa masa oraz sztywność. W pracy opisano proces tworzenia kompozytowych kół węglowych do pojazdu startującego w zawodach Shell Eco-marathon. Przeanalizowano zagadnienia związane z aerodynamiką kół oraz siłami na nie działającymi, a następnie przystąpiono do projektowania modułowego systemu pozwalającego na łatwą, szybką i bezinwazyjną dla łożysk ich wymianę. Koła ze względu na jednostkową produkcję wykonano metodą podciśnieniową, a poszczególne elementy połączono ze sobą jako element klejony. Badania doświadczalne wykazały, że uzyskane koło węglowe charakteryzowało się zdecydowanie większą sztywnością, mniejszym biciem promieniowym i osiowym.

Słowa kluczowe: pojazd energooszczędny, sztywność kompozytów, laminaty węglowe, wytrzymałość kompozytów

1. WSTĘP

W konstrukcjach, w których dużą rolę odgrywa sztywność oraz masa, coraz częściej wykorzystywane są kompozytowe struktury o podstawie epoksydowej, wzmocnione włóknem węglowym. Zawody Shell Eco-marathon są tego najlepszym przykładem. Studenci z całego świata konstruują pojazdy, których celem jest przejechanie jak najdłuższego dystansu, zużywając jak najmniejszą ilość energii. Kluczową rolę w uzyskaniu dobrych wyników odgrywiają małe opory aerodynamiczne, minimalizacja oporów tarcia, sztywność konstrukcji, a także mała masa pojazdu. Studenckie Koło Naukowe Rotor, działające przy Państwowej Akademii Nauk Stosowanych w Krośnie, startuje w wyżej wymienionych zawodach od 2016 r. Modernizacja poszczególnych elementów konstrukcji

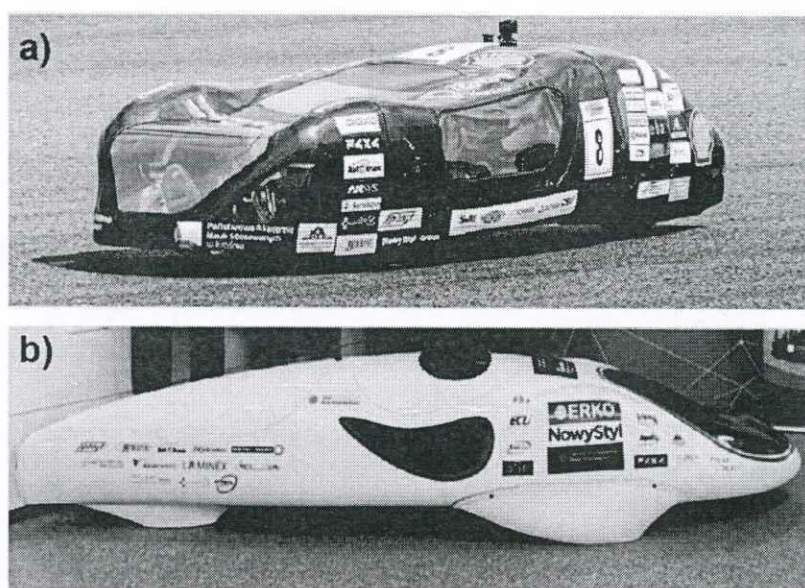


Fig. 1. Energy-saving vehicle; a) vehicle „Pila”, b) vehicle „Pila II”
Rys. 1. Pojazd energooszczędny; a) bolid „Pila”, b) bolid „Pila II”

bolidu „Piła” (rys. 1a) oraz zdobyte doświadczenie zaowocowały w 2023 r. ustanowieniem rekordu Polski wynoszącego 1048 km/L. Studenci w ramach swej działalności zbudowali samonośną konstrukcję nadwozia w oparciu o kompozyty węglowe i węglowo-aramidowe – bolid „Piła II” (rys. 1b). Analizy wykazały, że odkształcenia osiowe oraz bicie promieniowe i osiowe kół skrętnych pojazdu mają znaczący wpływ na uzyskiwane rezultaty. Koło o małej sztywności podczas jazdy w zakręcie odkształca się, powodując wzrost oporów toczenia, dlatego też podjęto próbę wprowadzenia nowatorskich rozwiązań w tym obszarze.

Koła energooszczędnego pojazdu powinny charakteryzować się: małymi oporami aerodynamicznymi, małą masą, kompatybilnością z oponami bezdętkowymi, dużą sztywnością oraz małym biciem promieniowym i osiowym [1].

2. ETAPY PROJEKTOWE

2.1. AERODYNAMIKA

Na podstawie analizy literatury stwierdzono, że najlepszym rozwiązaniem jeśli chodzi o energochłonność w pojazdach jest koło pełne. W przypadku kół zamkniętych rozkład prędkości powietrza jest dwuwymiarowy, zależny od prędkości obrotowej koła.

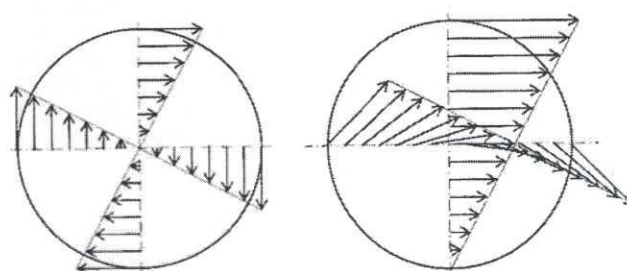


Fig. 2. Wind velocity distribution on a wheel; a) wheel with fairing, b) spoke wheel [2]
Rys. 2. Rozkład prędkości powietrza koła podczas jazdy; a) koło zamknięte, b) koło szprychowe [2]

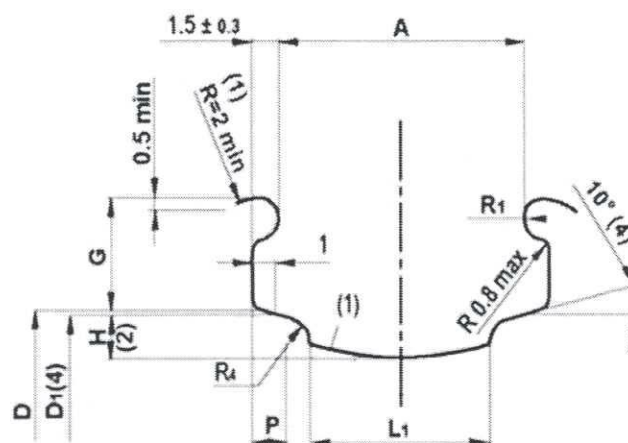
Rozpatrując przypadek koła otwartego (szprychy), rozkład prędkości powietrza jest różny w każdym punkcie koła; jest to składowa prędkości pojazdu oraz prędkości obrotowej koła [1] (rys. 2).

Badania udowodniły, że im mniejsza liczba szprych w kole, tym mniejsze opory aerodynamiczne. Najlepszym rozwiązaniem okazują się jednak koła zamknięte. Odpowiednio zaprojektowane i wykonane koło posiada również większą sztywność niż koło szprychowe. Kluczowe jest jednak znalezienie kompromisu pomiędzy masą, sztywnością oraz pracochłonnością wykonania tego typu kół [3, 4].

2.2. OPONY

Jedną z czołowych firm zajmujących się produkcją energooszczędnych opon jest firma Michelin, która opracowała modele o bardzo małych oporach toczenia przy ciśnieniu 5 bar: (i) 44-406, współczynnik oporu toczenia 0,0024, (ii) 35-406, współczynnik oporu toczenia 0,0024, (iii) 45-75R16, współczynnik oporu toczenia 0,00084.

Obecnie na rynku powszechnie dostępne są tylko opony 44-406. Opony te charakteryzują się małą masą (150 g) oraz bardzo małymi oporami toczenia w porównaniu z innymi 20-ca-



Rozmiar obręczy	A ±0,5	G ±0,5	H		L ₁ min.	P min.	R ₁ ±0,25	R ₂ min.	D	D ₁ ±0,5
			min.	max.						
406x19C	19	6	2,2	6	11	3	1,5	1,5	405,6	405,25
406x21C	21	6	2,2	6	11	3	2	2	405,6	405,25
406x23C	23	6,5	3,5	6,5	11	3	1,1	2,5	405,6	405,25
406x25C	25	6,5	3,5	6,5	14	3	1,1	2,5	405,6	405,25

Fig. 3. Rim size guide lines for tires Michelin 44-406 [5]
Rys. 3. Wytyczne dotyczące wymiarów obręczy dla opony Michelin 44-406 [5]

lowymi oponami [2]. Nie wymagają one również konieczności stosowania dętek. Producent podaje wytyczne co do kształtu i wymiarów obręczy (rys. 3). W pracy kształt obręczy wykonano zgodnie z oznaczeniem 406x25c; jedyną zmianą, którą wprowadzono było zwiększenie wymiaru „A” z 25 mm na 36 mm.

2.3. OBCIĄŻENIA I WARUNKI BRZEGOWE

Projektując koła do pojazdu „Piła II” należy wziąć pod uwagę wiele składowych i przypadków obciążeń występujących w pojeździe. Rozkład masy w pojeździe przyjęto jako: koło skątne (przednie) 23 kg, a koło tylne napędzające 46 kg. Sytuacja taka ma miejsce w przypadku, gdy pojazd porusza się w linii prostej oraz w spoczynku. W skrajnym przypadku w zakręcie pojazd może odciążyć koło wewnętrzne, dociążając tym samym 2-krotnie koło zewnętrzne. Podczas przyspieszania, jak i hamowania koło tylne obciążone jest momentem obrotowym [5]. Do analiz przyjęto tę wartość jako maksymalną wynikającą z przyczepności opony do nawierzchni, współczynnik tarcia opona-asfalt $\mu = 1,1$. Badania acetometrem przeprowadzone podczas modernizacji konstrukcji pojazdu „Piła” wykazały przeciążenia na poziomie 3,5 G [6]. Mając na uwadze powyższe, do dalszych rozważań przyjęto następujące wielkości obciążeń: moment obrotowy podczas hamowania 125 Nm, moment obrotowy podczas przyspieszania 20 Nm, siła promieniowa 1610 N, siła osiowa 510 N oraz ciśnienie w oponie 5 bar.

2.4. KONSTRUKCJA KOŁA

Uwzględniając konieczność częstego demontażu kół, zaprojektowano je tak, aby piasta była jego rozłączną częścią. Koncepcję tę przedstawiono na rys. 4. W kole wykonanym z kompozytu węglowego (1) wklejono pierścień centrujący (2) mocowany za pomocą śrub do piasty koła (3). Piastę tę natomiast osadzono na

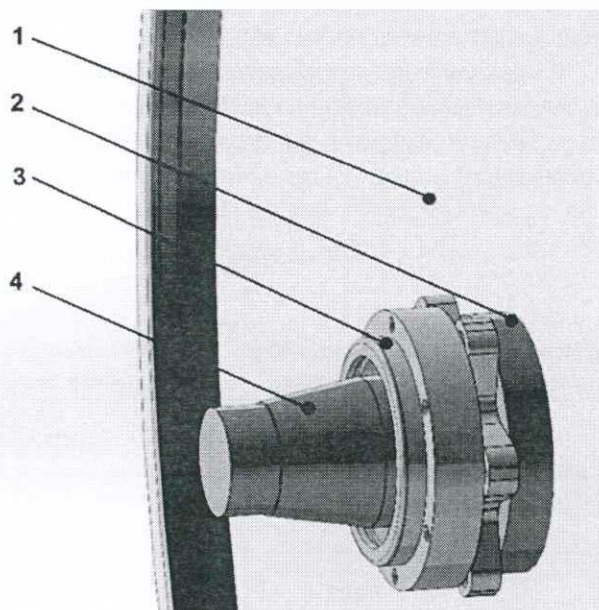


Fig. 4. Model of the modular wheel assembly system
Rys. 4. Model modułowego systemu montażu koła

łożyskach tocznych na osi koła (4). Zastosowanie takiego rozwiązania ułatwia sam proces wymiany koła, eliminuje konieczność każdorazowego demontażu łożysk, co znacząco wydłuża ich żywotność.

Wykonie pełnego koła węglowego w jednej operacji przy produkcji jednostkowej jest niemalże niemożliwe, dlatego też zostało ono zaprojektowane tak, aby poszczególne jego komponenty po procesie laminowania zostały połączone w całość za pomocą kleju. Na rys. 5 przedstawiono model takiego koła, gdzie: 1 – obręcz koła, 2 – dysk zewnętrzny, 3 – element przekładkowy, 4 – pierścień centrujący.

Na etapie projektowym w programie SolidWorks wykonano analizę wytrzymałościową (rys. 5). Na tej podstawie wstępnie dobrano grubości poszczególnych elementów kompozytu.

Mając na uwadze złożoność konstrukcji, różnorodność materiałów przekładkowych, połączenia klejowe oraz nieliniowość kompozytów węglowych, po ich wykonaniu poddano je badaniom doświadczalnym.

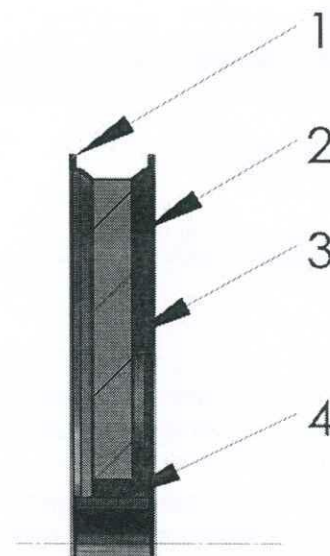


Fig. 5. Composite carbon wheel model
Rys. 5. Model kompozytowego koła węglowego

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Proces laminowania elementów koła poddanych w dalszej części badaniom wykonano metodą worka próżniowego (vacuum). Proces ten polegał na ręcznym nanoszeniu żywicy i przesycaniu kolejnych warstw tanin zbrojenia. Podciśnienie użyte w tym procesie pozwalało na zwiększenie współczynnika zbrojenia laminatu, a także zmniejszenie ryzyka wystąpienia pęcherzy powietrznych w wyrobie. Proces ten wymagał zachowania odpowiedniej struktury przedstawionej na rys. 6. Forma odzwierciedlająca kształt wyrobu była pokryta warstwą antyadhezyjną, na którą nakładano warstwy formowanego kompozytu. Następnie w celu zwiększenia chropowatości powierzchni, pozwalającej na uzyskanie lepszych właściwości podczas procesów klejenia, nakładano delaminaz. Kolejnymi warstwami były: folia rozdzielająca, mata przepuszc-

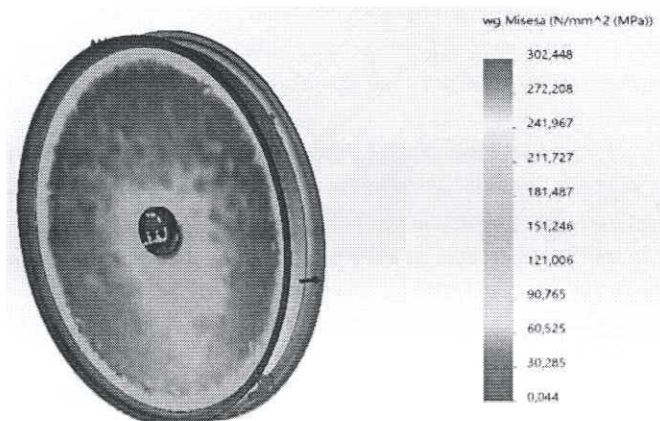


Fig. 6. Results of preliminary strength analyses
Rys. 6. Wyniki wstępnych analiz wytrzymałościowych

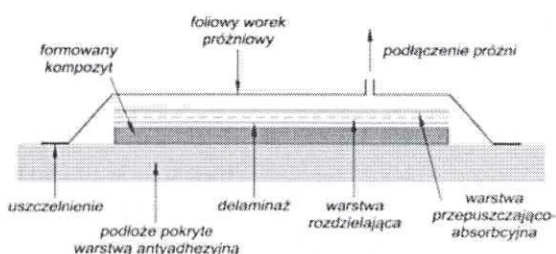


Fig. 7. Diagram of vacuum lamination [8]
Rys. 7. Schemat ideowy laminowania metoda podciśnieniową [8]

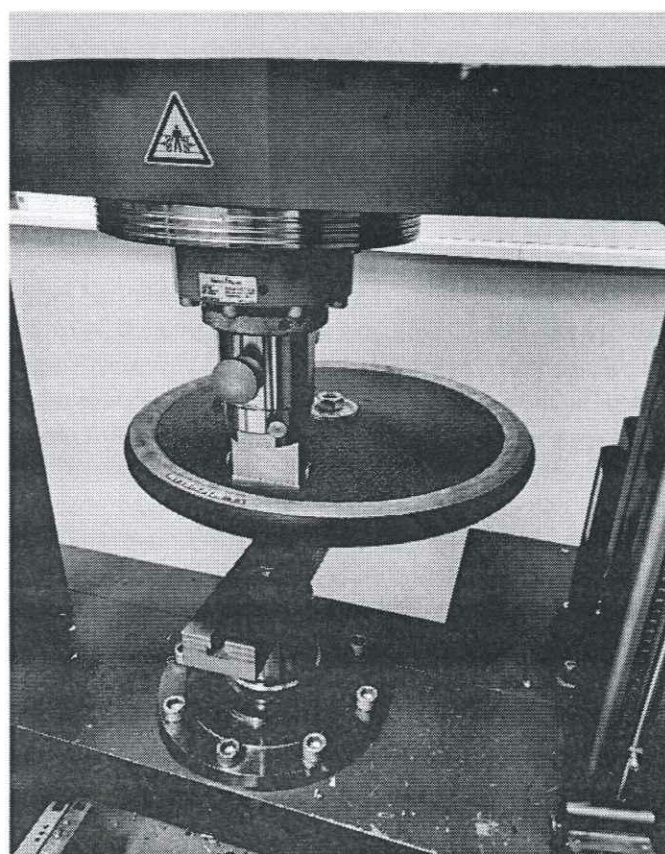


Fig. 8. Deformation test of a composite wheel
Rys. 8. Badanie odkształceń kompozytowego koła

czająco-absorbpcyjna oraz uszczelniony na brzegach elastyczny worek próżniowy. W worku umieszczony był zawór, do którego podłączano pompę próżniową wytwarzającą podciśnienie [7].

Wykonanie laminatów niezbędnych do zbudowania zaprojektowanego koła wymagało frezowania form pozwalających na ich wielokrotne użycie. Do tego celu użyto stop aluminium 7075. Użyty wosk separujący Formula Five zapewnił wytworzenie warstwy antyadhezyjnej pozwalającej na łatwe rozformowanie.

Do budowy kompozytowych kół węglowych wykorzystano materiały, takie jak: żywica epoksydowej L285; utwardzacz do

żywicy H285; tkanina węglowa 245g/m² Toray T300 3K 200tex; Honeycomb Aramid o grubości 20 mm, wielkości komórek 3,2 mm, gęstości 48 kg/m³; pianka HerexC70 o grubości 20 mm, gęstości 55 kg/m³; pianka AirexC70 o grubości 20 mm i gęstości 60 kg/m³; klej metaakryowy 10-15BLK (wytrzymałość połączeń klejowych 17–21 MPa [9]), pręt $\varnothing 60$, stop 7075 T6.

Kompozyty węglowe wytworzono metodą podciśnieniową. W celu uzyskania optymalnych parametrów wytrzymałościowych wygrzewano je następnie przez 15 h w temp. 60°C. Poszczególne warstwy tkaniny węglowej, zarówno w obręczy koła (10 warstw),

Table. Summary of the results of the tested wheel parameters
Tabela. Zestawienie wyników badanych parametrów kół

Parametr	Koło szprychowe	Koło kompozytowe Honeycomb Aramid	Koło kompozytowe pianka Herex	Koło kompozytowe pianka Airex
Masa, g	850	935	982	1020
Odkształcenie, mm	0,89	0,12	0,34	0,29
Bicie promieniowe, mm	0,18	0,03	0,02	0,04
Bicie osiowe, mm	0,15	0,04	0,06	0,03

jak i dyskach zamykających (2 warstwy), układano pod kątem 90° względem warstwy sąsiadującej. Pierścień centrujący natomiast wykonano z nadatkami na obróbkę po procesie klejenia ze stopu 7075. Wykonano 3 warianty kół, w których zastosowano różne materiały przekładkowe: honeycomb Aramid, piankę Herex oraz piankę Airex.

Badania sztywności kompozytowego koła przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZwickRoell Z100. Koło sztywne zamocowane za pierścień centrujący obciążono na krawędzi obręczy (rys. 7) siłą równą maksymalnej obliczeniowej sile osiowej występującej w pojeździe, tj. 510 N. Jako punkt odniesienia badaniom poddano również koło szprychowe. Bicie promieniowe i osiowe poszczególnych kół zmierzono w przyrządzie kłowym czujnikiem zegarowym. Zestawienie uzyskanych wyników wraz z masą poszczególnych kół zamieszczono w tabeli. Wykonane koła węglowe zamontowano w pojeździe „Piła II”, gdzie poddano je testom w warunkach rzeczywistych. Przeprowadzone jazdy nie wykazały uszkodzeń struktury kompozytu, jak i trwałych odkształceń promieniowych i osiowych (rys. 8).

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wszędzie tam, gdzie konieczne jest zachowanie małej masy przy dużej wytrzymałości i sztywności konstrukcji, coraz częściej wykorzystywane są laminaty węglowe. Wytwarzanie elementów z tych materiałów wymaga jednak dużego nakładu pracy. Konieczne jest wykonanie i odpowiednie przygotowanie form, co sprawia, że jest to kosztowny proces. W ramach przedstawionej pracy wykonano na potrzeby energooszczędnego pojazdu koła o zdecydowanie większej sztywności niż sztywność kół szprychowych. Do budowy kół użyto tkaniny węglowej Toray T300 3K 200tex 245g/m² jako zbrojenie oraz żywicę epoksydową L285 z utwardzaczem H285. Zaprojektowane w ramach pracy koło składa się z kilku laminatów połączonych ze sobą przy użyciu kleju metaakryowego 10-15BLK. Wykonane 3 warianty kół (materiał przekładkowy: Honeycomb Aramid, pianka Herex, pianka Airex) poddano badaniom wytrzymałościowym. Analizy wykazały, że sztywność kół węglowych jest zdecydowanie większa niż koła szprychowego. Odkształcenie koła w wyniku przyłożenia do krawędzi obręczy

siły równej 1610 N wyniosły 0,89 mm dla koła szprychowego, 0,22 mm dla koła z przekładką Honeycomb, 0,34 mm dla koła z przekładką Herex i 0,29 dla koła z przekładką Airex. Koła kompozytowe charakteryzowały się również mniejszym biciem promieniowym i osiowym, porównując te parametry z tradycyjnym kołem szprychowym. Uzyskano to dzięki zastosowaniu obróbki tokarskiej pierścienia centrującego po procesie klejenia poszczególnych komponentów. Opisywane koło szprychowe zostało uprzednio poddane centrowaniu, a prezentowane w pracy wyniki stanowią najlepszy rezultat, jaki udało się uzyskać w ramach tej operacji. Masa uzyskanych kół węglowych, w zależności od zastosowanych materiałów przekładkowych, mieściła się w przedziale 935–1020 g, co stanowi 10–20% więcej niż masa koła szprychowego.

ŹRÓDŁO FINANSOWANIA

Badania, których wyniki zaprezentowano w pracy, zostały sfinansowane ze środków Ministerstwa Edukacji i Nauki w ramach projektu SKN/SP/601784/2024 pt. „Opracowanie innowacyjnych kół z włókna węglowego”, realizowanego przez Studenckie Koło Naukowe Rotor Krosno. Środki na badania pochodziły z programu „Studenckie koła naukowe tworzą innowacje”.

LITERATURA

- [1] Tamai G.: The leading edge – aerodynamic design of ultra-streamlined land vehicles. Robert Bentley, Inc. (1999).
- [2] Santin J., Onder C., Bernard J., Isler D., Kobler P., Kolb F., Weidmann N., Guzzella L.: The world's most fuelefficient vehicle. Vdf Hochschulverlag A&G, an Der ETH Zurich (2007).
- [3] Rigueti S.: Design of a lightweight rim. Diploma Thesis Report (2003).
- [4] Tew G., Sayers A.: Aerodynamics of yawed racing cycle wheels. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. (1999).
- [5] www.mileage-challenge.com.
- [6] Durał D., Ochalek K.: Modernizacja konstrukcji ramy pojazdu startującego w zawodach Shell Eco-marathon. Napędy Sterowanie (2020).
- [7] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S.: Kompozyty. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej (2005).
- [8] Rabek J.F.: Polimery. Otrzymywanie, metody badawcze, zastosowanie. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa (2013).
- [9] www.acralock.com.



