

Analiza przykładów wykorzystania kompozytów typu CFRP w budowie pojazdów szynowych

Marcin SŁOWIŃSKI¹

Streszczenie

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie najważniejszych informacji dotyczących kompozytów typu CFRP i przykładów ich zastosowania w budowie pojazdów szynowych. W pierwszej części artykułu przedstawiono podstawowe cechy charakterystyczne kompozytów typu CFRP, a także zaprezentowano porównanie ich właściwości z właściwościami konwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych. Następnie omówiono przykłady wykorzystania kompozytów z tej grupy w budowie elementów konstrukcyjnych pojazdów szynowych. Ostatnią część artykułu stanowi analiza motywacji, które przemawiają za wprowadzeniem tego rodzaju kompozytów do inżynierskiej praktyki kolejowej.

Słowa kluczowe: kompozyty typu CFRP, włókna węglowe, nadwozie pojazdu szynowego, redukcja masy

1. Wprowadzenie

Kompozyty o osnowie polimerowej wzmocnione włóknami węglowymi, zaliczane do grupy CFRP (ang. *Carbon Fiber Reinforcement Plastics*), są interesującą grupą materiałów inżynierskich. Ich naczelną zaletą, w porównaniu do konwencjonalnych materiałów stosowanych w budowie maszyn, jest wysoka wartość wytrzymałości właściwej, czyli stosunku wytrzymałości na rozciąganie do ciężaru właściwego. Z powodu takich właściwości fizycznych oraz zmian zachodzących w ekonomice ich produkcji, w ostatnich latach odnotowuje się stały wzrost ich wykorzystania w budowie pojazdów, czego przykładem może być coraz szersza implementacja tego materiału do wielu zespołów konstrukcyjnych pojazdów szynowych.

2. Charakterystyka kompozytów typu CFRP

Kompozyty typu CFRP należą do grupy kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami. Połączenie włókien o dużej wytrzymałości z miękką, ciągliwą i lekką osnową, skutkuje uzyskaniem materiału o dużej wytrzymałości właściwej oraz sztywności [1]. W kompozytach CFRP osnowę stanowi zwykle polimer termoutwardzalny, taki jak żywica poliestrowa lub epoksydowa. Włókna węglowe otrzymuje się

w procesie pirolizy, najczęściej poliakrylonitrylu (PAN) lub pak mezogenicznych [2, 3]. Ich grubość jest bardzo mała i oscyluje w zakresie 8–10 μm, co zwiększa poziom skomplikowania ich następnego przetwórstwa. Do cech charakterystycznych włókien węglowych można zaliczyć ich stosunkowo niską gęstość (1,7–2,2 g/cm³), a także znakomitą wartość wytrzymałości na rozciąganie, zawierającą się w przedziale 2500–6000 MPa oraz moduł sprężystości w granicach 207–1035 GPa [4]. Osnowa z polimeru zapewnia odpowiednie związanie włókien węglowych oraz przenoszenie do nich obciążeń z osnowy. Gęstość osnowy z żywicy poliestrowej lub epoksydowej wynosi 1–1,2 g/cm³ [5]. W wyniku połączenia włókien węglowych z osnową wykonaną z polimeru możliwe jest osiągnięcie dużej wytrzymałości przy względnie niskiej masie.

Właściwości wytrzymałościowe kompozytu CFRP zależą przede wszystkim od proporcji udziału włókien w całym kompozycie, a także od ich splotu. Do zalet kompozytów z grupy CFRP można zaliczyć dużą sztywność, zdolność tłumienia drgań, dużą wytrzymałość właściwą oraz zmęczeniową, mały współczynnik rozszerzalności liniowej, a także możliwość nadawania skomplikowanych kształtów. Ponadto wykazują się dużą odpornością chemiczną, a także nie absorbują wody. Do zasadniczych wad tego typu materiału można zaliczyć relatywnie wysokie koszty produkcji i przetwórstwa, ograniczone możliwości

¹ Inż; Politechnika Poznańska, Instytut Transportu; e-mail: marcin.slowinski@put.poznan.pl.

naprawy oraz przewodnictwo elektryczne, które może być niepożądane w niektórych zastosowaniach. Z powodu swojej charakterystyki są najczęściej wykorzystywane do konstrukcji elementów wymagających dużej sztywności oraz odporności na szkodliwe działanie środowiska [6]. Porównanie właściwości grupy kompozytów CFRP, typowego kompozytu CFRP wraz z konwencjonalnymi materiałami używanymi na typowe elementy konstrukcyjne pojazdu szynowego przedstawiono w tabelicy 1.

Na podstawie zestawienia, można wyciągnąć wniosek, że naczelną zaletą kompozytów z grupy CFRP, w relacji do konwencjonalnie stosowanych materiałów na budowę pojazdów szynowych, jest większa wytrzymałość mechaniczna przy zdecydowanie niższej gęstości. Wraz ze zmniejszaniem barier ekonomicznych oraz technologicznych związanych z tego rodzaju produkcją kompozytów, stają się one alternatywą dla konwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych. Z powodu około 3-krotnie mniejszej gęstości kompozytów CFRP w porównaniu do gęstości stali można założyć, że jeden kilogram włókna węglowego zastępuje 3 kg stali w budowie elementu konstrukcyjnego, natomiast biorąc uwagę różnicę w wartości gęstości w stosunku do stopów aluminium – 1 kg kompozytu CFRP zastępuje 2 kg aluminium.

3. Przykłady wykorzystania CFRP w kolejnictwie

Ewolucje używanych materiałów do budowy pojazdów szynowych można podzielić na 3 etapy [10]:

- konstrukcje całkowicie stalowe,
- konstrukcje zawierające stopy aluminium,
- konstrukcje zawierające stopy lekkie oraz kompozyty.

Od końca lat 90. XX wieku obserwuje się wprowadzanie kompozytów do budowy pojazdów szynowych, a największy udział przypada kompozytom o osnowie polimerowej wzmocnionej włóknami (ang. FRP – *Fiber Reinforcement Plastics*). W tej grupie,

oprócz kompozytów wzmocnianych włóknem szklanym, zastosowanie na materiał konstrukcyjny pojazdów szynowych znajdują te wzmocnione włóknami węglowymi. Ze względu na swoją kluczową cechę, tj. wysoką wytrzymałość właściwą, ten rodzaj kompozytów może być stosowany na elementy przenoszące duże obciążenia statyczne oraz dynamiczne, przy jednoczesnej redukcji masy w stosunku do konwencjonalnych materiałów takich jak stal lub aluminium. Ponadto, możliwość nadawania złożonych geometrii umożliwia ich użycie na szeroki wachlarz elementów pojazdu, co czyni z nich uniwersalny materiał konstrukcyjny.

W budowie pojazdów szynowych aplikacja kompozytów z grupy CFRP odbywa się zasadniczo pod dwiema formami – pod postacią paneli lub kompozytów warstwowych, na które składają się płyty z CFRP z lekkim oraz wytrzymałym rdzeniem pomiędzy nimi, najczęściej wykonanym z aluminium [11]. W tabelicy 2 przedstawiono zastosowanie kompozytów typu CFRP do budowy pojazdów szynowych wraz z informacją nt. redukcji masy w stosunku do elementu wykonanego z materiału konwencjonalnego.

Opisując zastosowanie kompozytów z grupy CFRP do budowy pojazdów szynowych należy wspomnieć, że na początku lat 90. XX w. prowadzono w Japonii eksperymentalne próby ich implementacji do nadwozi pojazdów szybkobieżnych. Jednym z przykładów takich działań może być inicjatywa prowadzona przez Railway Technical Institute, Nippon Sharyo oraz Toray Industries, w której skonstruowano prototypowe pudło zbudowane w formie płyt wykonanych z kompozytu typu CFRP, usztywnionych ramą aluminiową. Łączenie między kompozytowymi płytami i ramą wykonano za pomocą nitów oraz kleju epoksydowego. Grubość płyt kompozytowych wynosiła 300 mm [12].

Korean Tilting Express Train (TTX) był jednym z pierwszych pojazdów szynowych wykorzystujących w konstrukcji nadwozia znaczący udział kompozytu typu CFRP, na który składało się połączenie osnowy z żywicy epoksydowej oraz włókien węglowych [10, 13]. Do budowy nadwozia wykorzystano

Tabelica 1

Porównanie właściwości materiałów inżynierskich na typowe elementy konstrukcyjne pojazdu szynowego

Właściwość materiałów	Kompozyty CFRP zbiorczo [7]	Żywica epoksydowa + włókna węglowe, (60% włókien, splot jednokierunkowy) [5]	Stal S355 [8]	Aluminium AL6082-T6 [9]
Gęstość [g/cm ³]	1,5–2,1	1,5	7,85	2,7
Granica plastyczności [MPa]	–	–	295–355	250–260
Wytrzymałość na zerwanie [MPa]	600–900	1600	450–680	290–310
Moduł sprężystości podłużnej [GPa]	37–784	120–200	190–210	69

[Opracowanie własne].

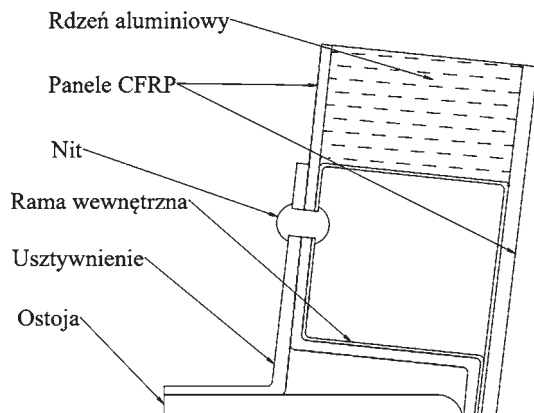
Tablica 2

Zestawianie konstrukcji z zakresu budowy pojazdów szynowych wykorzystujących elementy wykonane z CFRP

Projekt / pojazd	Elementy konstrukcyjne	Redukcja masy elementu wykonanego z CFRP w stosunku do konwencjonalnego materiału [%]
Korean Tilting Express Train (TTX)	nadwozie	38
CRRC CETROVO	nadwozie	30
	rama wózka	40
CRRC Optics Valley Quantum	nadwozie	30
Kawasaki efWING	resor piórowy	40 (w porównaniu do masy całego wózka)
	belka wzdłużna ramy wózka	
CaFiBo	rama wózka	36
Oś HMC (projekt NEXTGEAR)	oś zestawu kołowego	4–60

[Opracowanie własne].

kompozyt warstwowy, złożony z układu kompozytowych płyt, pomiędzy którymi znajdował się rdzeń heksagonalny (w kształcie plastra miodu) wykonany z aluminium A3031. W kluczowych odcinkach, takich jak w pobliżu okien lub dachu, pomiędzy płytami z CFRP dodatkowo znajdowała się wewnętrzna rama wykonana z nierdzewnych profili stalowych, połączona adhezyjnie lub nitami z płytami z kompozytu CFRP [14]. Całe nadwozie wykonano jako jeden element, co umożliwiło uniknięcie połączeń między jego segmentami [15]. Schemat połączenia nadwozia z ostoją przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat łączenia nadwozia z ostoją; opracowanie własne na podstawie [14]

Wykorzystanie kompozytu warstwowego składającego się z płyt CFRP oraz heksagonalnego, aluminiowego rdzenia umożliwiło uzyskać redukcję masy o 38% w stosunku do konwencjonalnego nadwozia wykonanego ze stali. Dzięki zmniejszeniu masy nadwozia pojazdu udało się obniżyć środek ciężkości pojazdu, co ma istotne znaczenie na dynamiczne zachowywanie się pojazdu podczas pokonywania łuków, szczególnie w pojazdach z wychylnym pudłem takich jak TTX. Analizy ekonomiczne użycia pudła

kompozytowego wykazały oszczędność konsumpcji energii na poziomie 42% w porównaniu do nadwozia wykonanego ze stali nierdzewnej oraz 21% w relacji do nadwozia wykonanego z aluminium [11].

Interesujące próby wprowadzenia kompozytów z grupy CFRP do budowy pojazdów szynowych prowadzi chiński producent taboru kolejowego CRRC. W 2018 r. we współpracy z Chińsko-Niemieckim zespołem CG Rail, w ramach projektu „Next Generation Metro Train” producent zaproponował wizję nowoczesnego pojazdu metra CETROVO [10]. Udział kompozytu CFRP w nadwoziu tego pojazdu to 70%, co przekłada się na redukcję masy o 30% w stosunku do konwencyjnych konstrukcji aluminiowych [16]. Ponadto, długość gwarancji na brak korozji oraz uszkodzeń zmęczeniowych wynosi 30 lat, co jest argumentem za zmniejszeniem kosztów eksploatacji pojazdu [10]. Do budowy nadwozia wykorzystano jednocześnie, wielokomorowe profile, a także płyty o grubości do 25 mm [16]. Wykorzystanie płyt o dużych gabarytach umożliwiło redukcję elementów oraz połączeń między nimi. W celu zapewnienia odpowiednich właściwości mechanicznych oraz technologicznych na poszczególne komponenty używano płyt kompozytowych o różnych orientacjach włókien. Ściana czołowa pojazdu, również wykonana z materiału typu CFRP, cechuje się innowacją polegającą na jej wydzieleniu od reszty nadwozia, co objawia się brakiem łączenia tych elementów za pomocą ostoj [17]. Panel podłogowy biegnący przez przednią kabinę składa się w 90% z CFRP [18]. Z kompozytu typu CFRP wykonano również ramę wózka. W pojeździe zaproponowanym przez firmę CG Rail, belki wzdłużne oraz poprzecznicze ramy wózka są wykonane z CFRP, co umożliwiło redukcję masy o 40% w stosunku do konwencjonalnych stalowych konstrukcji. Uzyskano także większą podatność samej ramy, co korzystnie wpływa na dynamiczne zachowanie się pojazdu.

Innym pojazdem CRRC, który w budowie nadwozia wykorzystuje znaczny udział kompozytu typu CFRP jest tramwaj Optics Valley Quantum, przeznaczony do obsługi szynowego transportu miejskiego w chińskim mieście Wuhan. W porównaniu do masy nadwozia wykonanego ze stali, masę nadwozia z udziałem kompozytów zredukowano o 30%. Zmniejszenie masy przekłada się na większy zasięg, co jest niebagatelną cechą, ponieważ ten tramwaj jest pojazdem, który może czerpać energię elektryczną magazynowaną w superkondensatorach, których ładowanie przez 2 minuty umożliwia przejechanie odcinka długości około 10 km [19, 20].

Próbie redefinicji architektury wózka pojazdu szynowego z wykorzystaniem włókien węglowych podjęła się firma Kawasaki w swoim projekcie efWING® (*environmentally friendly Weight-saving Innovative New Generation truck*) [21, 22]. Innowacyjne zastosowanie materiału z grupy CFRP polega na wytworzeniu z niego elementu, pełniącego zarówno funkcje belki wzdłużnej ramy wózka, jak i resora piórowego spełniającego rolę pierwszego stopnia usprężynowania pojazdu. Koncepcję tego rozwiązania przedstawiono na rysunku 2. Wskutek zastąpienia dwóch elementów jednym, zmniejszyła się liczba elementów złącznych, a po wprowadzeniu kompozytu typu CFRP zredukowano także masę wózka o 40% w porównaniu do stalowej ramy wózka, co przekłada się na zmniejszenie masy pojazdu o 400 kg [21].



Rys. 2. Wizualizacja koncepcji wózka efWING® [21]

Dodatkowo, wskutek zastosowania jednego resora wraz z ograniczoną liczbą mocowań uproszczono konstrukcję, w konsekwencji ograniczenie czynności obsługowych i wyeliminowanie potencjalnych miejsc usterek. Wózek Kawasaki efWING® wykorzystywany jest w wagonach Japan Railways Shikoku i Kyushu Railway Company [23]. Charakterystyczną cechą zewnętrzną wózków z rodziny efWing są jaskrawe kolory wahacza w celu zaakcentowania innowacyjności konstrukcji.

W Wielkiej Brytanii, w projekcie CaFiBo (*Carbon Fiber Bogie*), opracowywana jest koncepcja prototypowej, kompozytowej ramy wózka pojazdu Alstom Class 180, która przez redukcję masy w stosunku do konwencjonalnej konstrukcji ze stali, ma nieść ze sobą korzyści w postaci zmniejszenia szkodliwego oddziaływania pojazdu na torowisko. Redukcja masy w porównaniu ze stalową ramą wózka wynosi 36%. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że możliwe jest ograniczenie sił poprzecznych, jakimi oddziałuje

pojazd na tor, o 40%. Ponadto, dzięki zmniejszonej masie wózka, a w rezultacie całego pojazdu, zapotrzebowanie na paliwo jest zmniejszone o 20%. Do budowy ramy wózka wykonanej z kompozytu typu CFRP wykorzystano zarówno ten odzyskany w procesie recyklingu z konstrukcji wykorzystywanych w lotnictwie oraz przemyśle zbrojeniowym, jak i całkowicie nowy [24]. Zastosowanie odzyskanego materiału kompozytowego przekłada się na zmniejszenie wpływu na środowisko, tworzono proces technologiczny, a także zmniejszenie kosztów produkcji elementu. Wzmocnienie z włókien węglowych z odzyskanego kompozytu wykonano w postaci tkaniny, a z kompozytu nowego w postaci włókien o jednokierunkowym splocie. Osnowę wykonano z żywicy o podwyższonej ognioodporności [25]. Interesującą innowacją jest zastosowanie światłowodów w ramie, które odpowiadają za monitorowanie konstrukcji w czasie rzeczywistym, w celu walidacji wyników otrzymanych metodami symulacyjnymi. Z analiz ekonomicznych wynika, że redukcja masy o 590 kg w porównaniu do stalowej konstrukcji ramy wózka, przekłada się na roczne oszczędności z tytułu eksploatacji pojazdu i zawiera się w przedziale 8 000–62 000 funtów. Obecna wersja prototypu wciąż ma stalowe elementy w postaci łączników i zamocowań w celu zapewnienia właściwej współpracy z odpowiadającymi elementami w innych segmentach pojazdu. Z tego powodu dalsze prace będą skierowane na stworzenie całkowicie kompozytowej konstrukcji w celu uzyskania jeszcze większego poziomu redukcji masy i w efekcie szkodliwego wpływu na środowisko wywieranego przez pojazd.

Oprócz elementów takich jak segmenty nadwozia czy ramy wózków, badana jest możliwość wykorzystania materiałów z grupy CFRP do budowy osi zestawów kołowych. Próbie wykonania osi zawierającej elementy kompozytowe podjęli się eksperci biorący udział w projekcie NEXTGEAR. Zaprezentowano 3 koncepcje osi hybrydowej (ang. HMC – *Hybrid Metallic Composite*), z których każda zakładała kompozytowy charakter osi, tj. układ, w którym jej środkowa część jest wykonana z kompozytu z grupy CFRP, natomiast elementy takie jak podpięcia oraz czopy łożysk są wykonane ze stali. Taka budowa osi jest uwarunkowana tym, że klasyczny materiał jakim jest stal, znacznie lepiej współpracuje z pierścieniami wewnętrznymi łożysk, a także daje się połączyć skurczo, co ma miejsce w przypadku połączenia osi z kołami. Redukcja masy w zależności od wersji osi wynosi 8%, 23% lub 60%.

Analizowane są różne możliwości łączenia obydwóch części osi. W zależności od propozycji, łączenie fragmentu wykonanego z CFRP z częścią stalową odbywa się albo w sposób adhezyjny, albo elementem złącznym. Według zespołu badawczego biorącego udział

w projekcie Shift2Rail, największe nadzieje są związane z koncepcją zakładającą zastosowanie tuby z kompozytu na całej długości osi (rys. 3). Łączenie między kompozytową częścią i metalową realizowane jest za pomocą połączenia adhezyjnego. Dodatkowo w celu zapobiegnięcia ewentualnej dekompozycji osi, przez jej całą długość poprowadzono łączenie między dwiema częściami metalowymi. Redukcja masy osi zgodnej z tą koncepcją, w porównaniu do osi stalowej wynosi 60%.



Rys. 3. Koncepcja osi hybrydowej [26]

4. Motywacje wykorzystania CFRP w budowie pojazdów szynowych

4.1. Redukcja masy pojazdu

Na podstawie opisanych przykładów wykorzystania kompozytów z grupy CFRP w budowie pojazdów szynowych, można stwierdzić, że wykorzystuje się je do budowy następujących komponentów pojazdów szynowych:

- elementów nadwozia,
- ram wózków,
- osi zestawów kołowych.

Dzięki implementacji kompozytów z grupy CFRP do konstrukcji wymienionych elementów, możliwa jest redukcja masy o około 30–40% w stosunku do konstrukcji stalowych lub aluminiowych. Mimo, że w budowie pojazdów szynowych redukcja masy nie jest celem samym w sobie z powodu zdolności pociągowej oraz dużej przyczepności z torem jaką powinny cechować się pojazdy szynowe, to w niektórych aspektach dąży się do jej minimalizacji.

Rozpatrując udział masy poszczególnych elementów konstrukcyjnych w udziale wagowym pojazdu można posłużyć się wynikami zaprezentowanymi w [26]. Rozkład masy zbadano dla 6-członowego pojazdu metra i przedstawiono na rysunku 4.

Z analizy wynika, że największy udział wagowy w pojeździe mają jego wózki. Udział ich masy jest

niemal dwukrotnie większy aniżeli masy nadwozia, której udział w masie całego pojazdu wynosi 24%.

Tendencje konstrukcyjne z ostatnich lat przyczyniły się do tego, że wraz z rozwojem konstrukcji pojazdów szynowych, w kierunku tych zapewniających wysoki poziom bezpieczeństwa i komfortu jazdy, znacząco wzrosła masa wózka jako zespołu elementów. Spowodowane jest to jego wyposażeniem w różnego rodzaju elementy tłumiące lub urządzenia poprawiające bezpieczeństwo jazdy. Bazując na wykorzystaniu do budowy wózka konwencjonalnych materiałów takich jak stal czy aluminium, dalsza redukcja masy nie jest już możliwa. Szansą na zmniejszenie masy wózka i w efekcie całego pojazdu, która wzrosła wskutek instalacji nowych komponentów, jest możliwość wykorzystania materiałów kompozytowych takich jak kompozyty o osnowie polimerowej wzmocniane włóknami węglowymi, które cechują się wysokimi właściwościami wytrzymałościowymi przy znacząco niższej masie [21]. Analizując korzyści płynące z mniejszej masy pojazdu szynowego należy wymienić:

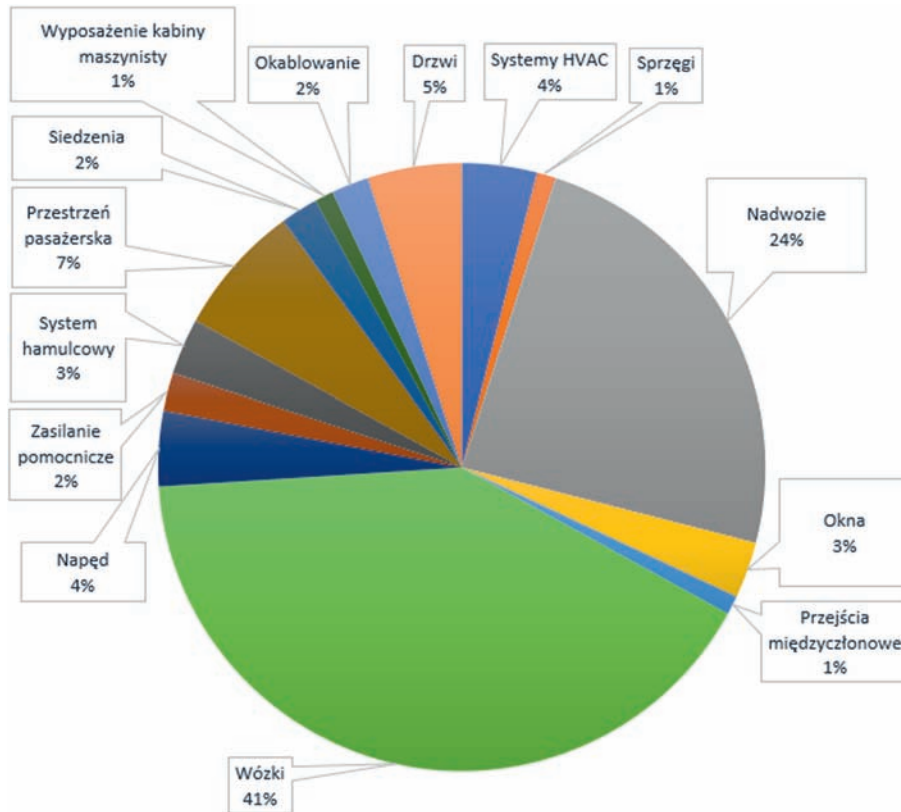
Ograniczenie zużywania się elementów pojazdu i jego szkodliwego wpływu na infrastrukturę

Redukcja masy całego pojazdu skutecznie wpływa na zmniejszenie wartości sił oddziałujących na styku koła z szyną i w konsekwencji ogranicza ich intensywność zużywania, a także redukuje emitowanie drgań i hałasu. Redukcja sił poprzecznych, uzyskana wskutek mniejszej masy pojazdu, którymi oddziałuje pojazd na torowisko podczas pokonywania łuku poziomego, przyczynia się do mniejszego zużywania się szyn. Zmniejszenie masy nieusprężynowanej, którą tworzy zestaw kołowy, również korzystnie przyczynia się do ograniczenia intensywności szkodliwych oddziaływań pojazdu na torowisko w postaci uderzeń i w efekcie na ograniczenie powstawania imperfekcji² zestawów kołowych lub szyn. Zmniejszona intensywność uszkodzeń pojazdu oraz torowiska przyczynia się do redukcji kosztów utrzymaniowych taboru oraz infrastruktury, a także bezpieczeństwa poruszania się pojazdu [11].

Zmniejszenie emisji substancji szkodliwych do środowiska

Od początku XXI wieku dąży się do ograniczenia szkodliwego wpływu transportu na środowisko, m.in. przez redukcję śladu węglowego generowanego przez każdy ze środków transportu, w tym kolej. Raport UIC z 2015 r. podaje, że sektor transportowy jest odpowiedzialny za 24,7% światowej emisji CO₂,

² Imperfekcja (ang. *imperfection*) – niedoskonałość.

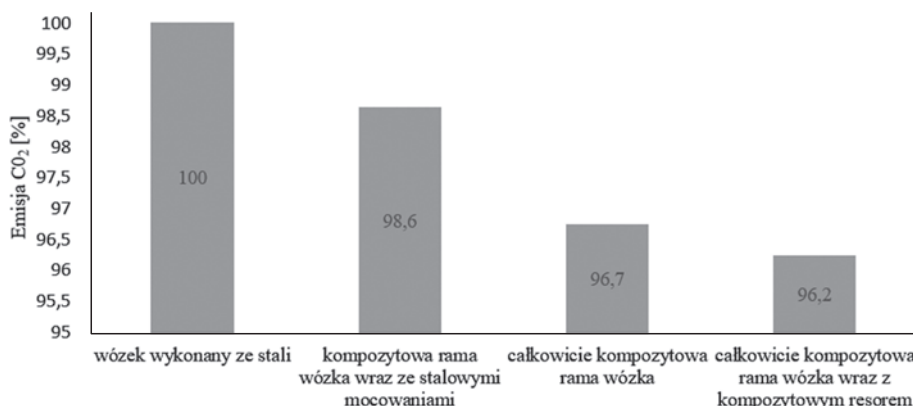


Rys. 4. Rozkład masy pojazdu szynowego; opracowanie własne na podstawie [26]

natomiast udział emisji w sektorze transportowym, generowanej przez pojazdy szynowe, to 4,2% [27]. Podaje się, że zastosowanie kompozytu na nadwozie pojazdu szynowego redukuje masę pojazdu o 30%, co przekłada się na redukcję emisji CO₂ podczas eksploatacji o około 5% [11].

Minimalizacja emisji szkodliwych substancji do otoczenia może zostać osiągnięta zarówno podczas procesu wytwórczego pojazdu, jak i jego dalszej eksploatacji. Kluczową cechą jest energooszczędność pojazdu, czyli jego zapotrzebowanie na paliwo podczas eksploatacji. Redukując masę pojazdu, przez zastosowanie materiałów o wysokiej wartości wytrzymałości

właściwej, takich jak kompozyty typu CFRP, możliwe jest osiągnięcie mniejszego zapotrzebowania na energię i w konsekwencji jej oszczędność. Szacuje się, że redukcja masy pojazdu o 10% przekłada się na 8% zysku w konsumpcji paliwa [27]. Na rysunku 5 przedstawiono porównanie poziomu emisji CO₂ w wózkach o różnym udziale elementów kompozytowych w materiale. Z analizy wynika, że im większy udział materiałów kompozytowych z wyeliminowaniem stali, tym mniejsza emisja CO₂ do atmosfery. Obliczono, że dla wózka wykonanego z kompozytu wraz z kompozytowym wahaczem następuje redukcja emisji o 3,8% w stosunku do klasycznej stalowej konstrukcji [24].



Rys. 5. Porównanie poziomu emisji CO₂ dla wózków o różnym udziale kompozytów w swojej budowie; opracowanie własne na podstawie [24]

Polepszenie dynamicznego zachowania się pojazdu

Dzięki budowie nadwozia pojazdu, zawierającej materiały z grupy kompozytów CFRP możliwa jest redukcja jego masy około 30%, co skutkuje obniżeniem jego środka ciężkości. Niższy środek ciężkości pojazdu przekłada się na polepszenie jego dynamiki, szczególnie podczas pokonywania łuków przez pojazdy szybkobieżne. Mniejsza masa przyczynia się również do osiągnięcia lepszych parametrów przyspieszania oraz sprawności hamowania. Ponadto, pozwala wykorzystywać, albo mniejszą moc trakcyjną, albo taką samą wraz z możliwością większej ładowności lub lepszego przyspieszania pojazdu [28].

4.2. Możliwość nadawania skomplikowanych kształtów

Nadawanie skomplikowanych geometrii kompozytom z grupy CFRP jest ułatwione z powodu ich anizotropowości. W porównaniu do obróbki plastycznej metali (stali, aluminium), kompozyty tego rodzaju dają znacznie szersze możliwości obróbki. Dzięki temu jest możliwe osiąganie złożonych powierzchni, wymaganych np. w przednich ścianach pojazdów dużych prędkości. Takie jednostki muszą mieć dobre właściwości aerodynamiczne, ponieważ w czasie przejazdu przez tunele, generują falę wysokiego ciśnienia. W celu jej redukcji pożądane jest, aby nos pojazdu miał aerodynamiczny kształt, co powoduje zmniejszenie stopnia sprężania powietrza przy wjeździe do tunelu. Zmniejsza się również fala ciśnienia podczas wyjazdu z tunelu i ograniczenie naprężeń działających na nadwozie [29].

Dodatkowo możliwe jest uzyskanie elementów o dużych gabarytach. Dla przykładu zasoby technologiczne wykorzystywane podczas produkcji pojazdu CETROVO umożliwiają wytwórstwo komponentów o rozmiarach nawet do 77 m [16]. Powoduje to zmniejszenie ilości komponentów pojazdu oraz połączeń między nimi, co znacznie ułatwia proces konstrukcyjny i utrzymaniowy pojazdu. Mniejsza ilość połączeń pomiędzy segmentami pojazdu eliminuje potencjalnie niebezpieczne miejsca.

4.3. Większa zdolność kompozytu do akumulacji energii w porównaniu z metalami

Inną właściwością niektórych kompozytów z grupy CFRP jest ich większa zdolność do akumulowania energii w porównaniu ze stalą lub aluminium. W tabelicy 3 przedstawiono porównanie energii odkształcenia akumulowanej przez kompozyty z grupy CFRP oraz stali konstrukcyjnej [5]. Stosunkowo duża zdolność do akumulowania energii kompozytów wzmacnianych włóknami węglowymi, jest cechą

wykorzystywaną podczas wykonywania ram wózków czy resorów.

Tablica 3

Porównanie zdolności do akumulacji energii odkształcenia przez stal konstrukcyjną oraz kompozyty z grupy CFRP

Material	Energia odkształcenia akumulowana przez materiał [kJ/kg]
Stal EN37	0,33
Żywica epoksydowa + włókna węglowe	2,45
Poliuretan + włókna węglowe	4,12

[Opracowanie własne].

Konserwatywne podejście do projektowania ram wózka zakłada uzyskanie dużej sztywności tego elementu, jednakże obecne ramy wózków są projektowane tak, aby cechowały się pewną podatnością w celu poprawienia właściwości biegowych i oddziaływania na tor [30].

Sprężyny piórowe, dawniej stosowane powszechnie w kolejnictwie, obecnie wykorzystywane są tylko w konstrukcji wagonów towarowych oraz w starych typach lokomotyw w postaci resorów zwykłych lub parabolicznych, o progresywnej charakterystyce tłumienia [31]. Do głównych cech resorów piórowych, które spowodowały ich wyparcie z konstrukcji nowoczesnych pojazdów szynowych można zaliczyć dużą masę oraz gabaryty zewnętrzne zespołu płaskich sprężyn z powodu użycia stali jako materiału konstrukcyjnego. Dzięki zastosowaniu resora piórowego wykonanego z kompozytu typu CFRP, możliwe jest wyeliminowanie tych wad z powodu dwóch naczelnych zalet tego materiału w stosunku do stali – większej zdolności do akumulacji energii oraz wartości wytrzymałości właściwej.

4.4. Zwiększenie konkurencyjności ekonomicznej kompozytów z grupy CFRP

Pomimo kosztownej technologii produkcji kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym, wskutek rozpowszechnienia się tego materiału w praktyce inżynierskiej, przewidywane jest obniżanie kosztów jego produkcji, co również stanowi argument przemawiający za rosnącą konkurencyjnością CFRP w stosunku do konwencjonalnych materiałów inżynierskich [32]. Dodatkowo, wysoki poziom odzyskiwania (recyklingu) CFRP, zmniejsza ilość odpadów występujących po wycofaniu pojazdu z eksploatacji [27]. Według [27], dla materiału typu CFRP, stosunek wagi całego elementu do masy odzyskanego, który może być wykorzystany ponownie na komponent pojazdu oraz stosunek wagi elementu do energii, która może być z niego

wytworzona, dla typowych elementów takich jak rama wózka lub nadwozie pojazdu szynowego wynoszą w obydwóch przypadkach 95%.

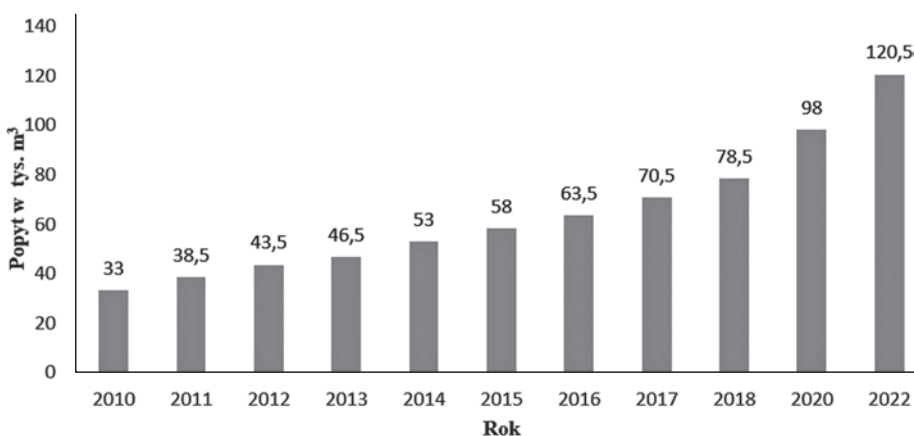
Na rysunku 6 przedstawiono światowy popyt na włókna węglowe na przestrzeni lat 2010–2022. Wynika z niego, że od 2010 r. do 2020 r. popyt na włókna tego rodzaju zwiększył się prawie czterokrotnie. Z powodu wysokiego poziomu skomplikowania produkcji, włókna węglowe są najdroższymi komponentami kompozytów typu CFRP, jednak rosnący na nie popyt wytwarza zależność, która powoduje zmniejszenie ceny tego materiału wskutek wzrostu jego popularności.

5. Podsumowanie

W ostatnich latach można odnotować duży wzrost implementacji materiałów z grupy CFRP w pojazdach szynowych. Liczne zalety kompozytów z osnową polimerową wzmocnionych włóknami węglowymi, a także poprawa technologii ich wytwarzania powodują, że ich znaczenie oraz udział w konstrukcjach pojazdów szynowych stale rośnie. Ten materiał stał się konkurencyjny w stosunku do stali oraz aluminium, obecnie najczęściej stosowanych materiałów. W strukturze klasycznego pojazdu szynowego, największy udział masy mają nadwozie oraz wózek. Z tego powodu są to elementy konstrukcyjne, w których klasyczne metale zastępuje się kompozytami typu CFRP. Dzięki zastosowaniu tej grupy materiałowej, oprócz zmniejszenia masy komponentu, możliwe jest wykorzystanie również innych zalet tych kompozytów jak: dobra obrabialność lub większa zdolność do tłumienia drgań w stosunku do nadwozia oraz wózka wykonanego ze stali. Biorąc pod uwagę tendencję zmierzającą ku ograniczeniu emisji CO₂ generowanej przez transport szynowy, również w tym przypadku kompozyty typu CFRP stają się grupą materiałową o dużym potencjale do szerszego stosowania w zespołach konstrukcyjnych pojazdów szynowych.

Literatura

1. Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2002.
2. Fejdyś M., Łandwijt M.: *Włókna techniczne wzmocniające materiały kompozytowe*, Techniczne Wyroby Włókiennicze, 2010, nr 18, s. 12–22, http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-LOD7-0030-0001/c/httpwww_moratex_euplikitww201012tw20101-2art1.pdf.
3. Chung D.D.L.: *Carbon composites: Composites with carbon fibers, nanofibers, and nanotubes: Second edition*, Butterworth-Heinemann, 2016.
4. Sorci R.: *Innovative Running Gear Solutions for New Dependable, Sustainable, Intelligent and Comfortable Rail Vehicles*. D2.3 Report on novel materials and manufacturing concept solutions, 2019.
5. Ghosh A.K., Dwivedi M.: *Processability of Polymeric Composites*, Springer, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-3933-8>.
6. Oczóś K.E.: *Kompozyty włókniste – właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa*, Mechanik, 2008, z. 81 s. 579–592.
7. Imad Shakir Abbood et.al.: *Jasim, Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures*, Materials Today: Proceedings. 43 (2021) 1003–1008. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.636>.
8. Material Properties of S355 Steel – An Overview, Meadinfo, 2015. <https://www.meadinfo.org/2015/08/s355-steel-properties.html>, [accessed February 22, 2021].
9. Aluminum 6082-T6, Matweb, <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=fad29be6e64d4e95a241690f1f6e1eb7&ckck=1> [accessed February 20, 2021].
10. J.-M. Im, K.-B. Shin: *Technology of Light Weight Railway Vehicle using Composite Materials*, International



Rys. 6. Światowy popyt na włókna węglowe od 2010 r. do 2020 r.; opracowanie własne na podstawie [33]

- Journal of Railway, 12 (2019) 23–27, <https://doi.org/10.7782/IJR.2019.12.2.023>.
11. Mistry P., Johnson M., Galappaththi U.: *Selection and ranking of rail vehicle components for optimal lightweighting using composite materials*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021, No. 235 pp. 390–402. <https://doi.org/10.1177/0954409720925685>.
 12. Suzuki Y.: *Railway Industry, in: Handbook of Adhesion Technology*, Springer, Berlin, 2011, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01169-6>.
 13. Kim S. et al.: *Analysis of the Composite Structure of Tilting Train Express (TTX)*, Proceedings of the KSR Conference, 2005, s. 657–662.
 14. S.I. Seo, J.S. Kim, S.H. Cho: *Development of a hybrid composite bodyshell for tilting trains*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 222 (2008) 1–13. <https://doi.org/10.1243/09544097JRR96>.
 15. Wennberg D.: *Light-weighting Methodology in Rail Vehicle Design through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels*, 2011, www.kth.se/en/sci/institutioner/ave/avd/rail%5Cnwww.kth.se/en/sci/institutioner/ave/avd/rail.
 16. A train made of carbon-fiber-reinforced plastic components, JEC Composites. (2018). <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/train-made-carbon-fiber-reinforced-plastic-components>, [accessed February 14, 2021].
 17. CG Rail, <https://cgrail.de/>, [accessed February 22, 2021].
 18. Siebel T.: *The World's First CFRP Rail Vehicle*, Springer Professional, 2018, <https://www.springer-professional.de/en/production---production-technology/engineering---development/the-world-s-first-cfrp-rail-vehicle/16135270>, [accessed February 14, 2021].
 19. Wuhan Optics Valley Tram, FORDYNO. <https://www.fordyno.com/wuhan-optics-valley>, [accessed February 14, 2021].
 20. New generation of carbon-fiber tramcar meets public in NE China, CGTN. (2018). https://news.cgtn.com/news/3d3d674d3251444d7a457a6333566d54/share_p.html, [accessed February 14, 2021].
 21. Nishimura T., Taga Y., Ono T.: *efWING® — New-Generation Railway Bogie*, Kawasaki Technical Review, 2016, pp. 27–32.
 22. Nishimura T.: *efWING — New-Generation Railway Bogie*, Japanese Railway Engineering, 2016, No. 194, pp. 13–14.
 23. Kawasaki Delivers CFRP efWING® Bogies to JR Shikoku, 2016, https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20160519_5864, [accessed February 20, 2021].
 24. Crosbee D., Rothwell E., Iwnicki S.: *Developing a carbon fibre railway bogie for passenger trains*, Global Railway Review, 2020, <https://www.globalrailwayreview.com/article/102360/carbon-fibre-bogie-passenger-trains-irr/> [accessed February 10, 2021].
 25. Mason K.: *Recycled carbon fiber on the rails*, Composite World, 2019, <https://www.composites-world.com/articles/recycled-carbon-on-the-rails>.
 26. Mistry P., Johnson M.: *Innovative Running Gear Solutions for New Dependable, Sustainable, Intelligent and Comfortable Rail Vehicles D3.1 – Analysis of the state of the art for composite materials suitable for rail wheelsets and related manufacturing processes*, 2020, pp. 1–59.
 27. Rungskunroch P., Kaewunruen S., Shen Z.J.: *An improvement on the end-of-life of high-speed rail rolling stocks considering CFRP composite material replacement*, Frontiers in Built Environment, 2019, No. 5 pp. 1–9, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00089>.
 28. Ulianov C., Önder A., Peng Q.: *Analysis and selection of materials for the design of lightweight railway vehicles*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, No. 292, pp. 1–7, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/292/1/012072>.
 29. Arifurrahman F., Budiman B.A., Aziz M.: *On the Lightweight Structural Design for Electric Road and Railway Vehicles using Fiber Reinforced Polymer Composites – A Review*, International Journal of Sustainable Transportation Technology, 2018, No. 1, pp. 21–29, <https://doi.org/10.31427/IJSTT.2018.1.1.4>.
 30. Finke S., Kominowski J., Motyl M.: *The effect of the bogie frame stiffness on running properties of rail vehicles* [Wpływ sztywności ramy wózka na własności biegowe pojazdów szynowych], Pojazdy Szynowe, 2019, No. 2, s. 49–57.
 31. Romaniszyn Z.: *Podwozia wózkowe pojazdów szynowych*, Wydawnictwo Instytutu Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010.
 32. Shama N. et al.: *Carbon Composites Are Becoming Competitive and Cost Effective*, Infosys Limited, 2018, pp. 1–12, <https://www.infosys.com/engineering-services/white-papers/Documents/carbon-composites-cost-effective.pdf>.
 33. Garside M.: *Global demand for carbon fiber from 2010 to 2022*, Statista, 2018, <https://www.statista.com/statistics/380538/projection-demand-for-carbon-fiber-globally/>.