







Zaprojektowanie materiału kompozytowego przeznaczanego na lekkie konstrukcje w motoryzacji

The lightweight composite material design for automotive industry

Katarzyna Suchorowiec^{1 A,E} , Piotr Szatkowski^{1 A,D,E} , Ewa Szczepanik^{1 C} ,
Rafał Twaróg^{1 C} , Michał Kisilewicz^{2 F} , Jacek Gralewski^{3 B} 

¹Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

²Akademia Tarnowska, ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnów, Poland

³Politechnika Łódzka, Wydział Zarządzania i Inżynierii Produkcji, ul. Wólczńska 221, 90-001 Łódź, Poland

Artykuł oryginalny

Abstrakt

Artykuł przedstawia koncepcje weryfikacji materiału kompozytowego zbrojonego włóknem szklanym w osnowie epoksydu mogącego znaleźć zastosowanie w nośnej konstrukcji ramy motocyklowej. Poddano analizie występujące typy ram motocyklowych umożliwiające zastosowanie kompozytów. Wytworzono próbki materiału kompozytowego z wykorzystaniem metody trzpieniowej dla wybranej konstrukcji ramy, badając wpływ różnej orientacji włókien szklanych. Próbki kompozytu poddano badaniom fizykochemicznym, określając podstawowe własności wytrzymałościowe, gęstość, pracę zniszczenia oraz przeprowadzono obserwację mikroskopową wykonanych próbek.

Abstract

The article presents the concept of a glass fiber reinforced composite in an epoxy matrix that can be used in a motorcycle frame. Motorcycle frames types enabling the composites usage were analyzed. Composite material samples with different glass fibers orientations were produced using the pin method. The manufactured composite material was subjected to physicochemical tests to determine basic strength properties, density, work of destruction, and microscopic observation was carried out.

Słowa kluczowe

- kompozyty
- motoryzacja
- projektowanie struktur kompozytowych

Udziały autorów

- A – przygotowanie badań
- B – gromadzenie danych
- C – analiza statystyczna uzyskanych wyników
- D – interpretacja uzyskanych wyników
- E – przygotowanie pierwotnej wersji tekstu
- F – przegląd literatury
- G – korekta i rewizja tekstu

Korespondencja

Michał Kisilewicz
e-mail: m_kisilewicz@atar.edu.pl
Akademia Tarnowska
ul. Mickiewicza 8
33-100 Tarnów, Poland

Informacje o artykule

Historia artykułu (Article history)

- Otrzymano (Received): 2023-07-04
- Zaakceptowano (Accepted): 2023-12-15
- Opublikowano (Published): 2023-12-21

Wydawca (Publisher)

Akademia Tarnowska
University of Applied Sciences in Tarnow
ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnow, Poland

Licencja (User license)

© by Authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License CC-BY-SA.

Finansowanie (Financing)

Badania nie zostały sfinansowane z grantów pochodzących ze środków publicznych, organizacji komercyjnych lub non-profit.

Konflikt interesów (Conflict of interest)

Nie zadeklarowano konfliktu interesów.

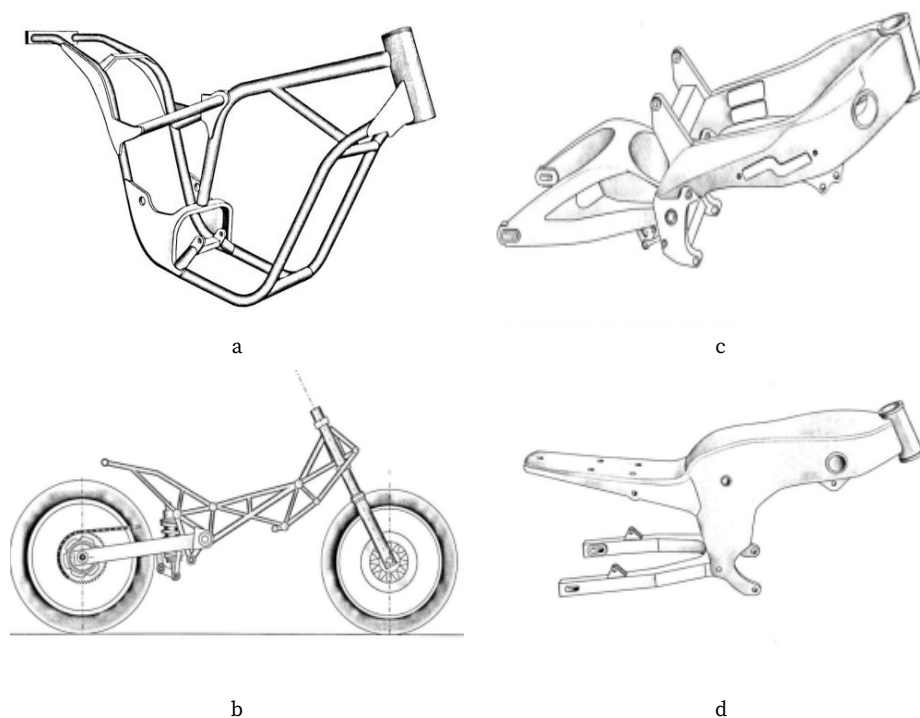
1. Wprowadzenie

Udział materiałów kompozytowych w konstrukcji pojazdów stale wzrasta. Materiały kompozytowe pozwalają na zmiany parametrów mechanicznych wykonanych z nich elementów. Sterując odpowiednio udziałami faz oraz sposobem ich rozmieszczenia, można zaprojektować i wytworzyć materiał zarówno lekki, jak i wytrzymały [1–4]. Wysoka wytrzymałość w połączeniu z niską gęstością materiału wpływa na obniżenie ciężaru właściwego. Niska wartość ciężaru właściwego może wpłynąć na: zmniejszenie zużycia paliwa, zwiększenie współczynnika przyspieszenia oraz poprawę bezpieczeństwa w wyniku zmniejszenia energii potrzebnej do hamowania. Obecnie z materiałów kompozytowych na skalę przemysłową wytwarzane są

pojedyncze elementy samochodów produkowanych wielkoskalowo oraz nadwozia luksusowych, sportowych samochodów.

Celem artykułu jest weryfikacja, czy możliwe jest zastosowanie w nośnej konstrukcji ramy motocyklowej kompozytu wzmocnionego włóknem szklanym w osnowie żywicy epoksydowej oraz wytypowanie optymalnego pod względem parametrów wytrzymałościowych ułożenia ciągłej fazy wzmacniającej.

Rama motocyklowa jest elementem nośno-konstrukcyjnym, której parametry mechaniczne są dobierane w zależności od jej przeznaczenia. Na rynku istnieje wiele rodzajów ram motocyklowych, część z nich przedstawiono na rysunku 1. W badaniach postanowiono wykonać kompozyt o profilu rury, który można wykorzystać w ramie motocyklowej o konstrukcji kratowej.



Rysunek 1. Rodzaje stosowanych ram w motocyklach [5]
a – kołyskowa, b – kratownicowa, c – grzbietowa, d – *monocoque*

Materiałami powszechnie obecnie stosowanymi w konstrukcji ram motocyklowych są stal oraz lekkie stopy metali nieżelaznych. Przeprowadzone próby usztywnienia ram motocyklowych poprzez zastosowanie sztywnych kompozytowych konstrukcji wzmocnionych włóknami węglowymi typu *monocoque* wykazały efekt „przesztywnienia” struktury nośnej [6–8]. „Przesztywnienie” konstrukcji negatywnie wpłynęło na parametr sterowania motocyklem, m.in. poprzez przeniesienie zbyt

dużej ilości drgań na kierownicę, obniżając dokładność prowadzenia oraz zmniejszając komfort motocyklisty w czasie prowadzenia pojazdu [9–10]. Jednym ze sposobów obniżenia wysokiej sztywności ramy może być zastosowanie kompozytu opartego na materiałach o niższych parametrach sztywności, np. włókien szklanych [11,12]. Własności kompozytu można z łatwością modyfikować poprzez zastosowanie:

- różnych rodzajów osnowy i fazy wzmacniającej;

- odpowiedniej orientacji włókien;
- właściwej metody produkcji.

W porównaniu z materiałami konwencjonalnymi (stal, aluminium, magnez, tytan), kompozyty cechują się wyższymi parametrami mechanicznymi (wytrzymałością właściwą) przy zachowaniu niższego ciężaru właściwego [1]. W tabeli 1 zostały porównane najważniejsze właściwości materiałów kompozytowych oraz typowych materiałów stosowanych w konstrukcji ram. Przeprowadzone analizy wytrzymałościowe ramy

motocyklowej wskazują, że na szczególne obciążenia są narażone następujące elementy ramy motocyklowej: główka ramy, mocowanie tylnego wahacza, mocowanie silnika. Wskazane fragmenty ramy ze względów technologicznych są trudne do wykonania z materiałów kompozytowych wzmocnianych włóknami ciągłymi. Jest to spowodowane występowaniem w tych miejscach kompensacji sił ścinających. W celu zabezpieczenia niewrażliwych dla konstrukcji miejsc stosuje się wkładki wykonane z metalu.

Tabela 1. Podsumowanie najważniejszych właściwości materiałów do konstrukcji ram motocyklowych [13]

Materiał	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł Younga [GPa]	Ciężar właściwy [N/m ³]	Wytrzymałość właściwa [MPa/g · cm ⁻¹]	Moduł właściwy [GPa/g · cm ⁻¹]
Stal 18NiCrMo5	1250	210	7,86	15,9	2,7
Stop Aluminium AlCu4SiMg	420	72	2,70	15,6	2,7
Stop Magnezu az91	260	45	1,80	14,4	2,5
Stop Tytanu 6AL-4V	800	112	4,50	17,8	2,5
CFRP, 60% kompozyt zawierający włókna węglowe	1300	200	1,60	81,3	12,5
KFRP, 60% kompozyt zawierający włókna aramidowe	1200	85	1,40	85,7	6,1
GFRP, 60% kompozyt zawierający włókna szklane	1050	50	1,80	50,5	4,1

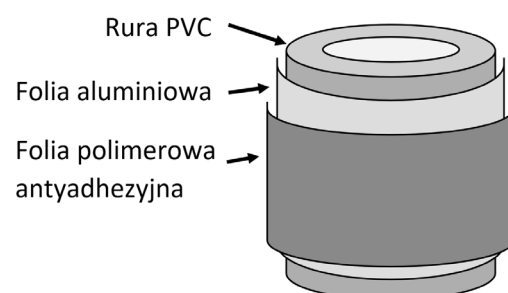
2. Sposób wytwarzania rur z kompozytu włókno szklane – żywica epoksydowa

Zastosowano technologię formowania na mokro z wyjmowanym rdzeniem (rura PVC o średnicy zewnętrznej $28,00 \pm 0,01$ mm). W celu ściągnięcia kompozytu z rdzenia nałożono trzy warstwy składające się kolejno z smaru silikonowego oraz nawiniętej folii aluminiowej oraz dalsze trzy warstwy z folii PE o grubości 10 μ m (rysunek 2).

2.1. Wykonanie kompozytu

Kompozyt został wykonany z tkaniny szklanej o gramaturze 200 g/m² (tkanina szklana 200 g/m² AEROGLOSS,

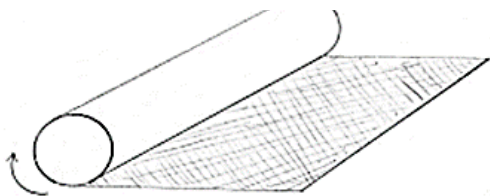
plot płócienny włókno szklane typu E, gęstość szkła w tkaninie 2,56 g/m²) z której wycięto pasy o szerokości 450 ± 10 mm oraz $100,0 \pm 0,2$ mm. Jako osnowę zastosowano żywicę epoksydową (Epidian 601) i utwardzacz (Z1) zmieszanych w stosunku wagowym 75 : 25.



Rysunek 2. Schemat wytwarzania form do nawijania

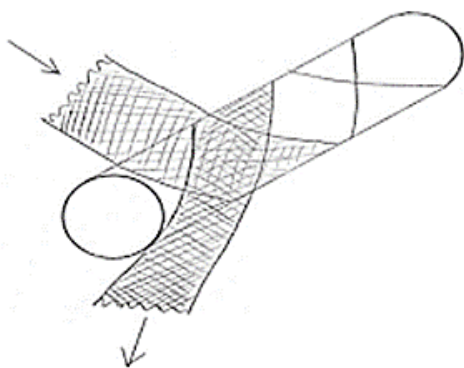
W badaniach zastosowano dwa sposoby nawijania:

1. Pas o szerokości 450 mm został nawinięty równoległe do osi trzpienia. Sposób nawijania tkaniny na formę przedstawia rysunek 3.



Rysunek 3. Schemat wytwarzania rury zawijanej

2. Pasy o szerokości 100 mm nawinięto naprzemiennie pod kątem 45° w stosunku do osi trzpienia (radialnie). Nawijanie przeprowadzono dwukrotnie. W celu zwiększenia spójności strukturalnej zastosowano nakładki maty o szerokości 10 ± 1 mm. Sposób nawijania cienkich pasków tkaniny szklanej przedstawia rysunek 4.



Rysunek 4. Schemat wytwarzania rury radialnej

Z rur wyciśnięto nadmiar żywicy i pozostawiono je na 90 h w temperaturze otoczenia. Po usieciowaniu żywicy, rury zostały zdjęte z form w celu zbadania ich własności mechanicznych (rysunek 5).

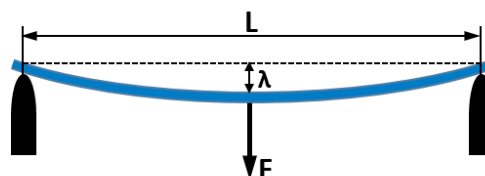


Rysunek 5. Pocięte i posegregowane próbki

3. Zastosowane metody badawcze

3.1. Badania mechaniczne

Określenie własności mechanicznych wytworzonych próbek kompozytu wzmocnionych włóknami prowadzone były na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick 1435, według normy PN-EN ISO 14125. Wyznaczono wartości statycznego zginania, tj. wytrzymałość przy zginaniu, moduł sprężystości przy zginaniu, odkształcenie (szerokość podpór 60 mm, szybkość pomiaru 1 mm/min) oraz przygotowano dwie serie próbek o długości 120 ± 1 mm, średnica zmierzona została za pomocą suwmiarki ze sprężem. Wyznaczona wartość wytrzymałości na zginanie posłużyła do obliczenia modułu sprężystości przy zginaniu.



Rysunek 6. Schemat trójpunktowego zginania próbek

Wyznaczenie modułu sprężystości przy statycznym zginaniu obliczono metodą regresji podczas badania wytrzymałości na zginanie w zakresie odkształcenia sprężystego (szerokość podpór 25 mm, szybkość pomiaru 1 mm/min). W tym celu przygotowano dwie serie po 5 próbek, wycinając z każdej z rur prostopadłościanny; wymiary zmierzono zostały za pomocą suwmiarki ze sprężem.

Pracę zniszczenia obliczono z wykorzystaniem metody wagowej. Wyznaczony na maszynie wytrzymałościowej Zwick 1435 wykres działającej siły na próbkę siły [N] do powodującego ją odkształcenia [mm] wydrukowano i następnie wycięto fragment w kształcie prostokąta, obliczono jego pole powierzchni i zważono go na wadze analitycznej; analogicznie postąpiono z polem pod krzywą przebiegu siły rozciągania. Korzystając z proporcji, wyznaczono pracę zniszczenia dla próbki rury radialnej oraz zawijanej. Wyniki przeprowadzonych pomiarów zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pracy zniszczenia dla rury radialnej oraz zawijanej

Próbka	Radialna	Zawijana
Praca zniszczenia dla fragmentu Wz [J]	10	4
Masa fragmentu m [g]	0,008	0,008
Masa wykresu [g]	0,317	0,351
Praca zniszczenia W [J]	396,25	175,50

Z uzyskanych w próbie statycznego zginania pomiarów dla prostopadłościennych próbek rury zawijanej oraz radialnej (rysunek 7) wyznaczono moduł Younga obliczony ze wzoru [14,15]:

$$E = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot \lambda \cdot a \cdot h^3} \quad (1)$$

gdzie:

F – siła [N];

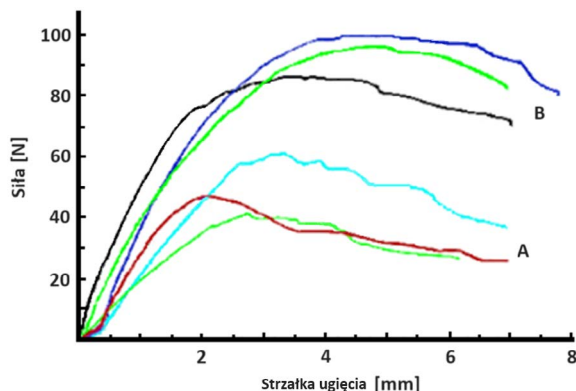
l – odległość między podporami [mm];

λ – strzałka ugięcia [mm];

a – szerokość próbki [mm];

h – wysokość próbki [mm].

Wartości siły oraz strzałek ugięcia zostały odczytane z wykresów zginania dla odkształcenia sprężystego, czyli takiego w którym badany element mógłby pracować odwracalnie i przenosić bez plastycznych zmian w swoim kształcie naprężenia.

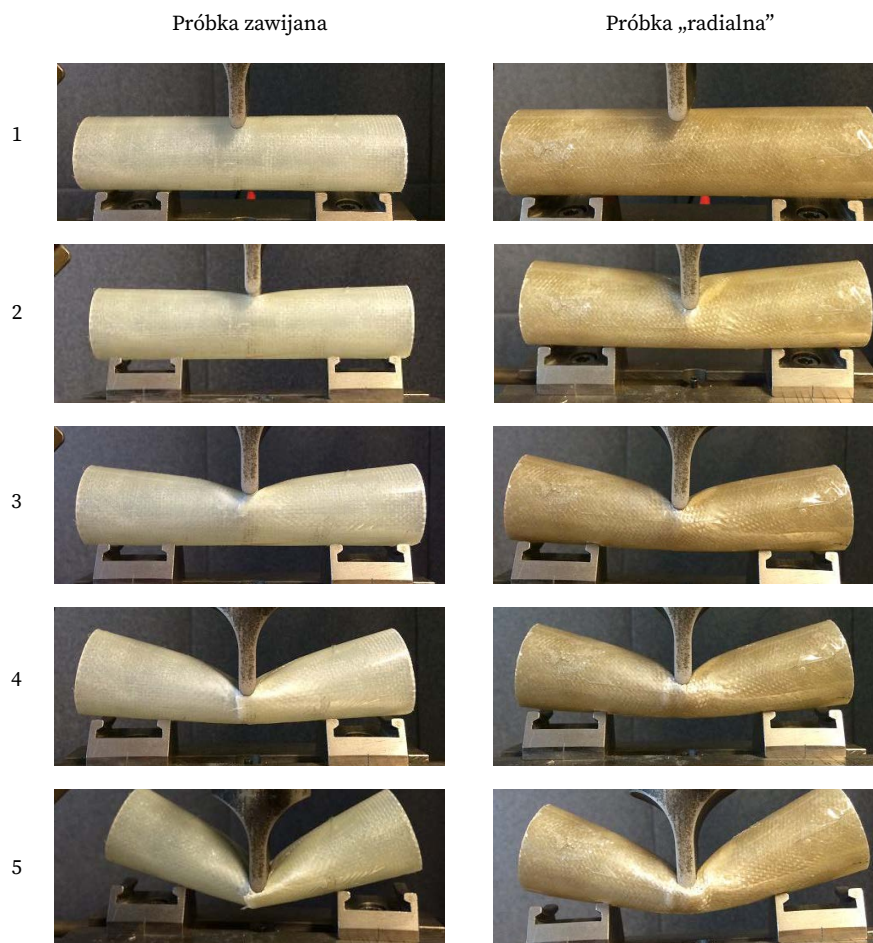
**Rysunek 7.** Wykres statycznego zginania wykonanych próbek rury: zawijanej (A) oraz radialnej (B)

Wyniki obliczonych modułów Younga zamieszczono w tabeli 3. Wyniki i zdjęcia przebiegu zniszczenia ilustruje rysunek 9.

Tabela 3. Tabela zbiorcza wyników dla rury radialnej oraz zawijanej

Parametr	Ułożenie równoległe	Ułożenie radialne	
Wymiary	Średnica wewnętrzna d [mm]	28,90 ± 0,01	28,80 ± 0,01
	Średnica zewnętrzna D [mm]	30,95 ± 0,01	31,95 ± 0,01
	Grubość g [mm]	1,025 ± 0,01	1,575 ± 0,01
Wytrzymałość na zginanie σ [Mpa]	17,6 ± 0,5	28,3 ± 0,5	
F_{\max} [N]	813,4 ± 0,5	2062,0 ± 0,5	
ε [mm] dla F_{\max}	14,5 ± 0,5	14,4 ± 0,5	
Udział objętościowy włókien V_w [%]	66,095 ± 0,392	57,349 ± 1,538	
Udział porów otwartych [%]	10,52 ± 2,84	1,66 ± 0,58	
Moduł sprężysty przy zginaniu E [GPa]	7,3 ± 0,3	2,8 ± 0,2	
Moduł właściwy E/ρ [GPa/g/cm ³]	4,05 ± 0,02	1,66 ± 0,02	
Wytrzymałość właściwa σ/ρ [MPa/g/cm ³]	9,69 ± 0,02	16,72 ± 0,02	
Praca zniszczenia [J]	175,50 ± 0,02	396,25 ± 0,02	
Współczynnik kształtu [-]	30,19 ± 0,02	20,29 ± 0,02	
Gęstość hydrostatyczna ρ [g/cm ³]	1,82 ± 0,05	1,70 ± 0,05	
Gęstość teoretyczna ρ_t [g/cm ³]	2,10 ± 0,05	1,98 ± 0,05	
Gęstość hydrostatyczna / gęstość teoretyczna [%]	86,5 ± 0,1	85,6 ± 0,1	
Grubość warstwy włókna – żywica [μ m]	224 ± 37	259 ± 9	

Zdjęcia na rysunku 8 przedstawiają mechanizm rozpraszania naprężeń na powierzchni badanej rury kompozytowej. Kąt zapadania się rury świadczy o wyższej wartości wytrzymałości na ścinanie. Rura wytworzona metodą zawijania zapada się pod naporem trzpienia łatwiej w porównaniu do rury nawijanej metodą radialną. Świadczy to o niskim zasięgu przenoszenia naprężeń przez włókna w rurach zawijanych w porównaniu do radialnych.



Rysunek 8. Głębokość odkształcenia próbek podczas ich zginania: 1–2 mm; 2–6 mm; 3–12 mm; 4–20 mm; 5–30 mm

3.2. Ocena porowatości i obserwacje mikroskopowe

Obliczenie udziału objętościowego włókien w kompozytach (dwie próbki z każdej z rur) wykonano zgodnie z procedurą zawartą w normie ASTM D3171-22).

Analizę struktury kompozytu prowadzono przy pomocy mikroskopu stereoskopowego (mikroskop cyfrowy Keyence, typ VHX-900F). Obserwację mikrostruktury przeprowadzono na próbce wyciętej prostopadle do kierunku osi rury. Powierzchnię otrzymanego pierścienia poddano szlifowaniu w celu odkrycia mikrostruktury.

Wykonane obserwacje mikroskopowe pozwoliły wykryć obecność obcych cząstek oraz porów. Prawdopodobną przyczyną obecności cząstek i porów jest zastosowana technologia wytwarzania kompozytu. Grubość warstwy przesączonej tkaniny szklanej w rurze radialnej zawiera się w $259 \pm 9 \mu\text{m}$ i wykazuje mniejszy rozrzut w porównaniu z rurą związaną $224 \pm 37 \mu\text{m}$ (rysunek 9).

W przypadku rury związanej rozrzut grubości warstwy jest związany z fluktuacją siły związania w trakcie procesu wytwarzania.

Wyznaczono gęstość hydrostatyczną kompozytu obliczona ze wzoru:

$$\rho_p = \frac{m_p}{m_p - m_w} \cdot \rho_w \quad (2)$$

gdzie:

m_p – masa próbki w powietrzu [g];

m_w – masa próbki w wodzie [g];

ρ_p – gęstość próbki [g/cm^3];

ρ_w – gęstość wody w danej temperaturze [g/cm^3],

Do wyznaczenia udziału porów otwartych posłużono się wzorem:

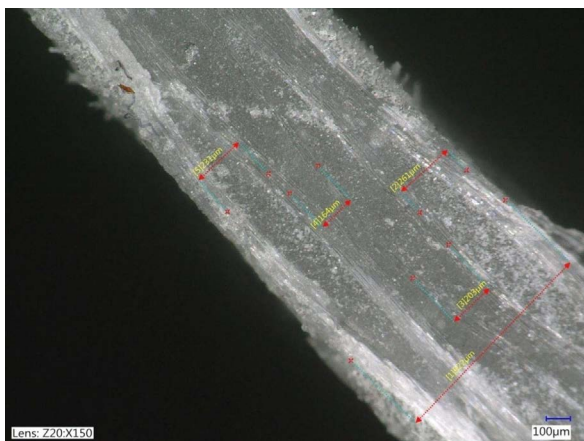
$$P = 100 - \frac{m_{wm}}{m_{pg}} 100 \quad (3)$$

gdzie:

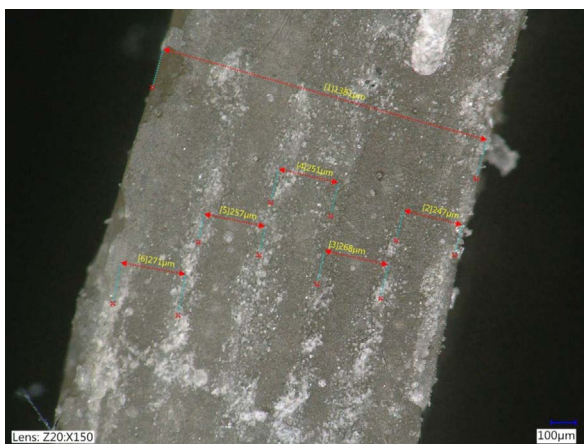
m_{wm} – masa próbki w wodzie [g];

m_{pg} – masa próbki w wodzie po gotowaniu [g].

Próbka zawijana



Próbka „radialna”



Rysunek 9. Zdjęcie przekroju wytworzonych kompozytów z oznaczeniem szerokości warstw

Gęstość teoretyczną kompozytów obliczono ze wzoru:

$$\rho_t = \rho_d V_w + \rho_o V_o \quad (4)$$

gdzie:

ρ_d – gęstość włókien [g/cm^3]; założono włókna szklane

$\rho = 2,56 \text{ g}/\text{cm}^3$;

ρ_o – gęstość osnowy [g/cm^3]; założono żywicę epoksydową;

$\rho = 1,2 \text{ g}/\text{cm}^3$

V_w – udział objętościowy włókien [-];

V_o – udział objętościowy osnowy [-].

Współczynnik kształtu został obliczony dla przekroju pierścieniowego dla przypadku sprężystego zginania. Zastosowano wzór [14,15]:

$$\varphi = D/g \quad (5)$$

gdzie:

D – średnica zewnętrzna rury [mm];

g – grubość ścianki [mm];

φ – współczynnik kształtu [-].

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli zbiorczej (tabela 3).

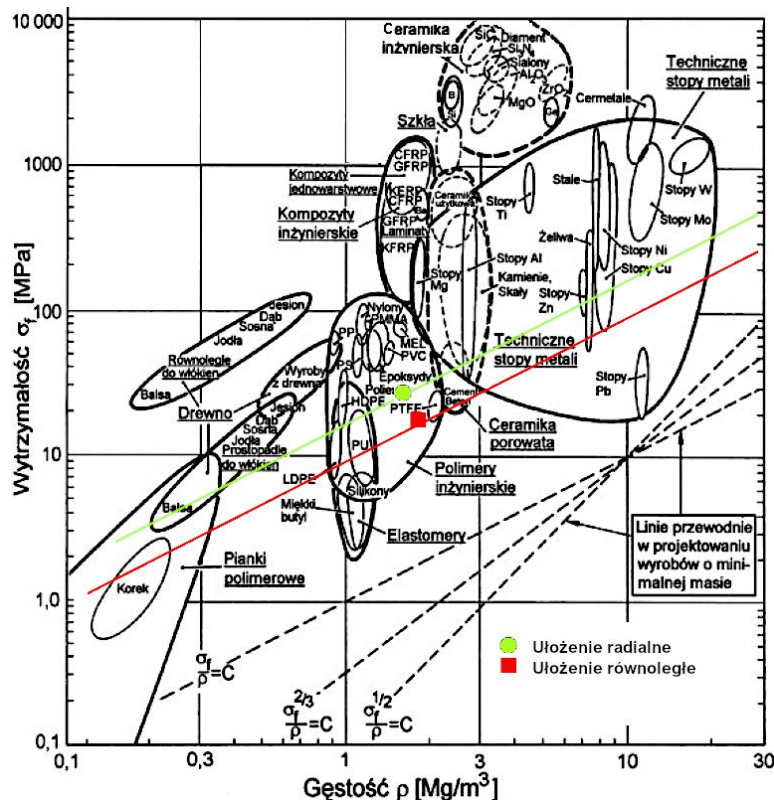
Następnie obliczono wytrzymałość i gęstość materiału z uwzględnieniem współczynnika kształtu. Ukształtowany materiał o wytrzymałości σ i gęstości ρ będzie się zachowywał tak samo jak materiał nieukształtowany o wytrzymałości σ'' i gęstości ρ'' . Aby wyznaczyć gęstość i wytrzymałość posłużono się wzorami:

$$\sigma'' = \sigma/\varphi \quad (6)$$

$$\rho'' = \rho/\varphi \quad (7)$$

Wyliczone wartości σ' oraz ρ' dla rury radialnej oraz zawijanej zamieszczono w tabeli 3.

Na wykresie Ashby'ego naniesiono zmierzone wartości gęstości oraz wytrzymałości na zginanie wykonanych rury kompozytowych (rysunek 10). Punkty na wykresie mieszczą się w obrębie parametrów polimerowych tworzyw sztucznych. Próbki wykazały się niższą od zakładanej wartością wytrzymałości w porównaniu z żywicą epoksydową, co jest związane z obecnością porowatości w objętości materiału kompozytowego. Na przedłużeniu linii doboru materiału posiadającego radialne ułożenie włókien znajduje się obszar stopów aluminium, pomimo obecności 2% porowatości w objętości tworzywa. Zmniejszenie udziału porowatości powinno wpłynąć na przesunięcie linii wyboru tworzywa w kierunku wyższych wartości wytrzymałości. Wytrzymałość mechaniczna kompozytu jest zależna od: kształtu porów (pory cylindryczne, sferyczne), dystrybucji porów w objętości kompozytu oraz wielkości porów. Badania wpływu porowatości na parametry mechaniczne dla próbki o 2% porowatości osiągały wartości 75%–80% wartości parametrów mechanicznych próbki niezawierającej w swojej objętości porowatości, natomiast dla próbek posiadających 10% porowatości wartość parametrów mechanicznych spada do 50%–80% wartości w porównaniu do materiałów bez porowatego materiału [16]. Zwiększenie wytrzymałości może pozwolić na osiągnięcie wytrzymałości właściwej stali konstrukcyjnej oraz wysoko wytrzymałych stopów aluminium. Widoczna różnica w porowatości pomiędzy próbkami (zob. tabela 3) jest związana prawdopodobnie z dogodniejszym odgazowaniem zachodzącym podczas formowania pasa tkaniny o radialnym ułożeniu włókien. W nawijanych rurach możliwość zastosowania wałków do odgazowania żywicy epoksydowej nie jest możliwa, ze względu na sferyczny kształt elementu, natomiast zbyt duży docisk, np. wałkiem, powodowałby przesuwanie się włókien w ułożonych warstwach i niejednorodne rozmieszczenie tych włókien w objętości tworzonej rury.



Rysunek 10. Wykres Ashby'ego z oznaczonymi punktami reprezentującymi zmierzone własności kompozytu o ułożeniu włókien radialnym (kolor zielony) oraz równoległym (czerwony) oraz liniami doboru materiałów [17]

4. Podsumowanie i wnioski

Sposób ułożenia włókien ma istotny wpływ na właściwości mechaniczne projektowanych materiałów kompozytowych. Rura zawijana może być traktowana jako kompozyt dwuwymiarowy (2D), natomiast rura radialna jako kompozyt wielowymiarowy (nD).

Obie rury posiadają nieznacznie różniące się średnice wewnętrzne, natomiast rura radialna jest grubsza od rury zawijanej, dzięki czemu parametry wytrzymałościowe przyjmują wyższe wartości. Wartość pracy zniszczenia jest ponad dwukrotnie wyższa dla rury radialnej w porównaniu z rurą zawijaną. Wykres Ashby'ego wskazuje, że nawet jeśli obie rury byłyby tych samych rozmiarów, to i tak pod względem wytrzymałościowym lepsze wyniki uzyskano by dla kompozytu radialnego.

Różnice pomiędzy wartościami gęstości teoretycznej a gęstości wyznaczonej empirycznie mogą być spowodowane obecnością pęcherzyków powietrza, obcych wtrąceń, ale przede wszystkim metodą wytwarzania tych kompozytów i usuwania powietrza podczas procesu nawijania. Te czynniki powodują, że gęstość teoretyczna jest nieco większa od gęstości zmierzonej empirycznie.

Rura zawijana posiada wyższy Moduł Younga, wynikający z kierunku ułożenia włókien. Wartości mniejsze lub porównywalne do Modułu Younga żywicy epoksydowej dla próbek radialnych są wynikiem ułożenia włókien oraz możliwych defektów osnowy (wtrącenia fazy gazowej).

Zmierzony udział objętościowy włókien jest wyższy dla rury zawijanej w porównaniu z rurą nawijaną radialnie. Prawdopodobną przyczyną jest sposób ich wytwarzania. Zaobserwowano łatwiejsze wyciśnięcie żywicy w wyniku procesu zwijania (nadmiar żywicy z powierzchni zewnętrznej nie został zeszlifowany).

Zastosowanie kompozytów w konstrukcji ram motocyklowych może przynieść korzyść, jaką jest nadanie bardzo dobrych właściwości mechanicznych przy bardzo niskim ciężarze właściwym.

Współczesny przemysł motocyklowy nie stosuje lekkich ram kompozytowych w produkcji seryjnej. Wykonane próby na torach wyścigowych wykazały zbytnie „przesztwinienie” konstrukcji prowadzące do utrudnień w prowadzeniu motocykla. Wprowadzenie kompozytu do konstrukcji ramy może wpłynąć na obniżenie masy motocykla, a w konsekwencji na zwiększenie

zasięgu jazdy przy zachowaniu wydatku energetycznego. Przedstawione podejście badawcze próbuje obniżyć sztywność konstrukcji w porównaniu z konstrukcjami typu *monocoque*. Obniżenie sztywności konstrukcji powoduje, że przy niewielkich prędkościach łatwiej jest sterować motocyklem, a zacieśnienie zakrętu w trakcie szybkiej jazdy wymaga mniej wysiłku ze strony kierowcy. Zmniejszenie sztywności ramy wpływa również pozytywnie na przyczepność w trakcie jazdy sportowej, tłumiąc część nierówności i ograniczając możliwość utraty przyczepności.

Przeprowadzone badania wykazały że jest możliwe wytworzenie materiału kompozytowego o zmiennej sztywności związanej z charakterystyką ułożenia włókien.

Pomimo że rury zostały wykonane metodą ręczną, ich parametry wytrzymałościowe są bardzo dobre i mogłyby być brane pod uwagę jako alternatywa dla ram nośnych motocykli i rowerów.

Szczególnie interesująca jest metoda nawijania radialnego, która jest korzystniejsza przy łączeniu węzłów strukturalnych, np. z główką ramy czy łożyskowanie wahacza, pozwalając na wykorzystanie wysokich parametrów mechanicznych włókien ciągłych bez utraty ich ciągłości i owinięcie ich wokół elementów ramy szczególnie narażonych na naprężenia.

Bibliografia

- [1] Ashby MF. *Materials Selection in Mechanical*. 4th ed. Burlington: Butterworth-Heinemann; 2011.
- [2] Ashby MF, Jones DRH. *Materiały inżynierskie*. [T.] 1. Właściwości i zastosowania. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne; 1995.
- [3] Ashby MF, Jones DRH. *Jones, Materiały inżynierskie*. T. 2. Kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów, dobór materiałów. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne; 1995.
- [4] Ashby M, Shercliff H, Cebon D. *Inżynieria materiałowa*. T. 1. Łódź: Wydawnictwo Galaktyka; 2011.
- [5] Cocco G. *Motorcycle Design and Technology: How and Why*. Milan: Giorgio Nada; 2013
- [6] Feraboli P, Masini A, Taraborrelli L, Pivetti A. Integrated development of CFRP structures for a topless high performance vehicle. *Composite Structures*. 2007;78(4): 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.11.011>.
- [7] Liu Q, Xing H, Ju Y, Ou Z, Li Q. Quasi-static axial crushing and transverse bending of double hat shaped CFRP tubes. *Composite Structures*. 2014;117:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.06.024>.
- [8] O'Dea N. Motorcycle swingarm redesigned in carbon composite. *Reinforced Plastics*. 2011;55(6):36–41. [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(11\)70184-9](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(11)70184-9).
- [9] Foale T. *Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and Science*. 2nd ed. [S.l.]: Tony Foale; 2006.
- [10] Cossalter V. *Motorcycle Dynamics*. 2nd ed. [S.l.]: Lulu Com; 2006.
- [11] Sathishkumar TP, Satheeshkumar S, Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2014;33(13):1258–1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>.
- [12] Morgan P. Properties of carbon fibers. In: Morgan P, editor. *Carbon Fibers and Their Composites*. Boca Raton: Taylor & Francis; 2005.
- [13] Fejdyś M, Łandwajt M. Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe. *Techniczne Wyroby Włókiennicze*. 2010;18(1/2):12–22.
- [14] Massalski J, Massalska M. *Fizyka dla inżynierów*. Cz. 1. Fizyka klasyczna. Warszawa: Wydawnictwo WNT; 2012.
- [15] Halliday D, Resnick R, Walker J. *Fizyka dla inżynierów*. Cz. 2. Fizyka współczesna. Warszawa: Wydawnictwo WNT; 2013.
- [16] Bowles KJ, Frimpong S. *Relationship Between Voids and Interlaminar Shear Strength of Polymer Matrix Composites*. San Diego: NASA; 1991.
- [17] Dobrzański LA. *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe*. Warszawa: Wydawnictwo WNT; 2006