

Tomasz Siwowski

MOSTY Z KOMPOZYTÓW FRP

KSZTAŁTOWANIE
PROJEKTOWANIE
BADANIA



PWN

MOSTY Z KOMPOZYTÓW FRP

KSZTAŁTOWANIE
PROJEKTOWANIE
BADANIA

Tomasz Siwowski

MOSTY Z KOMPOZYTÓW FRP

KSZTAŁTOWANIE
PROJEKTOWANIE
BADANIA

Projekt okładki: **Natalia Ludwikowska**; wykonanie: **Ireneusz Gawliński**

Ilustracja na okładce: **Artur Wysocki**

Recenzenci: **Prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak**, PK
Prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski, dr h.c. (em. prof. zw. PW i PŁ)

Wydawca: **Karol Zawadzki**

Koordynator ds. redakcji: **Adam Kowalski**

Redaktor: **Anna Bogdanienko**

Produkcja: **Mariola Grzywacka**

Dział reklamy: **Agnieszka Borzęcka** (agnieszka.borzecka@pwn.com.pl)

Łamanie: **Pracownia Obrazu – Anna Sandecka Łąkocy**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w Internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo.
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2018

ISBN: 978-83-01-19921-0

Wydanie I

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288; infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl www.pwn.pl

Druk i oprawa: OpolGraf S. A.

Spis treści

Wykaz oznaczeń	11
Wykaz skrótów	15
Przedmowa	19
1. Wprowadzenie	23
1.1. Podstawowe definicje	24
1.2. Ogólna charakterystyka kompozytów FRP	29
1.3. Zastosowanie kompozytów FRP w budownictwie mostowym	38
Piśmiennictwo do rozdziału 1	47
2. Kompozyty polimerowe FRP jako materiał do budowy mostów	51
2.1. Składniki polimerowych kompozytów włóknistych	52
2.1.1. Włókna	52
2.1.2. Żywice	60
2.1.3. Preimpregnaty (prepregi)	68
2.1.4. Materiały rdzeniowe	69
2.1.5. Środki pomocnicze, modyfikujące i ochronne	73
2.2. Własności mechaniczne i fizyczne kompozytów FRP	75
2.2.1. Rozciąganie	75
2.2.2. Ściskanie	85
2.2.3. Ścinanie w płaszczyźnie laminatu	86
2.2.4. Ścinanie międzywarstwowe	86
2.2.5. Zginanie	88
2.2.6. Rozszerzalność termiczna	90
2.2.7. Tłumienie	91
2.3. Trwałość zmęczeniowa	91
2.4. Odporność na pękanie	96
2.5. Podatność na pełzanie	99
2.6. Odporność na uderzenie	102
2.7. Odporność na ogień	107
2.8. Wpływ oddziaływań środowiskowych	110
2.8.1. Temperatura	110
2.8.2. Wilgotność	115
2.8.3. Środki chemiczne	117
2.8.4. Promieniowanie UV	118
2.8.5. Korozja	119
2.8.6. Synergia wpływów środowiskowych	120

2.9. Podsumowanie	123
Piśmiennictwo do rozdziału 2	125
3. Technologie wytwarzania elementów konstrukcyjnych z kompozytów FRP	131
3.1. Wprowadzenie	132
3.2. Metody laminowania ręcznego	133
3.2.1. Metoda ręczna otwarta (metoda kontaktowa)	133
3.2.2. Metoda ręczna zamknięta (metoda worka próżniowego)	134
3.3. Metody półautomatyczne	136
3.3.1. Metoda infuzji próżniowej	136
3.3.2. Metoda prasowania tłoczego	144
3.4. Metody automatyczne	146
3.4.1. Metoda RTM	146
3.4.2. Metoda nawijania ciągłego	148
3.4.3. Metoda przeciągania (pultruzja)	150
3.5. Porównanie technologii wytwarzania elementów z kompozytów FRP	154
Piśmiennictwo do rozdziału 3	156
4. Przegląd konstrukcji mostowych z kompozytów FRP	159
4.1. Wprowadzenie	160
4.2. Mosty drogowe	161
4.2.1. Konstrukcje z laminatów i płyt warstwowych	161
4.2.2. Konstrukcje z kształtowników pultruzyjnych	167
4.2.3. Konstrukcje hybrydowe	172
4.3. Kładki dla pieszych	180
4.3.1. Konstrukcje z laminatów i płyt warstwowych	180
4.3.2. Konstrukcje z kształtowników pultruzyjnych	188
4.4. Pomosty kompozytowe w obiektach mostowych	195
4.4.1. Charakterystyka ogólna	195
4.4.2. Rehabilitacja mostów belkowych	196
4.4.3. Rehabilitacja mostów kratownicowych	201
4.4.4. Modernizacja mostów zwodzonych	205
4.4.5. Poszerzanie mostów	210
4.4.6. Pomosty w nowych obiektach mostowych	210
4.5. Podsumowanie	215
Piśmiennictwo do rozdziału 4	227
5. Analiza teoretyczna i podstawy projektowania konstrukcji kompozytowych	235
5.1. Wprowadzenie	236
5.2. Mikromechanika kompozytów	239
5.2.1. Stałe materiałowe laminy	239
5.2.2. Charakterystyki wytrzymałościowe laminy	243
5.2.3. Lamina zbrojona dwukierunkowo	246
5.3. Makromechanika i klasyczna teoria laminacji	247
5.4. Kryteria wytrzymałościowe	258
5.4.1. Uwagi ogólne	258
5.4.2. Kryterium maksymalnego naprężenia	260

5.4.3.	Kryterium Azziego–Tsaia–Hilla	261
5.4.4.	Kryterium Tsaia–Wu	262
5.4.5.	Nośność kompozytu FRP	264
5.5.	Projektowanie konstrukcji kompozytowych	267
5.5.1.	Podstawy projektowania	267
5.5.2.	Materiałowe współczynniki bezpieczeństwa	270
5.5.3.	Współczynniki konwersji.	271
5.5.4.	Stany graniczne nośności	274
5.5.5.	Stany graniczne użyteczności	277
5.6.	Analiza pomostu kompozytowego	277
5.6.1.	Opis konstrukcji	277
5.6.2.	Opis materiału	278
5.6.3.	Opis obciążenia	284
5.6.4.	Analiza statyczna pomostu	284
5.6.5.	Analiza wytrzymałościowa pomostu	290
5.6.6.	Sprawdzenie ugięcia pomostu	296
5.6.8.	Podsumowanie analizy pomostu	296
5.7.	Analiza dźwigara kompozytowego	297
5.7.1.	Opis konstrukcji	297
5.7.2.	Opis materiału	298
5.7.3.	Opis obciążenia	300
5.7.4.	Analiza statyczna dźwigara	301
5.7.5.	Analiza wytrzymałościowa dźwigara (SGN)	302
5.7.6.	Sprawdzenie ugięcia dźwigara	306
5.7.7.	Podsumowanie analizy dźwigara	307
5.8.	Wykorzystanie MES do analizy konstrukcji kompozytowych	307
5.8.1.	Uwagi ogólne	307
5.8.2.	Model konstrukcji	308
5.8.3.	Modele materiałów	309
5.8.4.	Model obciążenia	310
5.8.5.	Wybrane wyniki analizy MES	310
5.8.6.	Porównanie obliczeń MES z rozwiązaniem analitycznym	318
5.8.7.	Podsumowanie analizy MES	320
	Piśmiennictwo do rozdziału 5	320
6.	Kształtowanie i badania dźwigarów mostowych z kompozytów FRP.	327
6.1.	Dźwigary z laminatów i płyt warstwowych	328
6.2.	Dźwigary z kształtowników pultruzyjnych	342
6.3.	Dźwigary hybrydowe „kompozyt FRP – beton”	357
6.4.	Dźwigar kompozytowy z laminatów typu KŁADKA	368
6.4.1.	Kształtowanie materiałowo-konstrukcyjne dźwigara	368
6.4.2.	Badania wytrzymałościowe dźwigara	371
6.4.3.	Ocena nośności i sztywności dźwigara na podstawie badań	380
6.5.	Dźwigar kompozytowy z laminatów typu COMBRIDGE 1	384
6.5.1.	Kształtowanie materiałowo-konstrukcyjne dźwigara	384
6.5.2.	Badania wytrzymałościowe dźwigara	388
6.5.3.	Ocena nośności i sztywności dźwigara na podstawie badań	391

6.6.	Dźwigar hybrydowy „kompozyt FRP – beton” typu COMBRIDGE 2	393
6.6.1.	Kształtowanie materiałowo-konstrukcyjne dźwigara	393
6.6.2.	Badania wytrzymałościowe dźwigara	398
6.6.3.	Ocena nośności i sztywności dźwigara na podstawie badań	401
6.7.	Podsumowanie	403
	Piśmiennictwo do rozdziału 6	407
7.	Kształtowanie i badania pomostów z kompozytów FRP	413
7.1.	Pomosty warstwowe	414
7.2.	Pomosty z kształtowników pultruzyjnych	423
7.3.	Pomosty o konstrukcji mieszanej	431
7.4.	Pomosty hybrydowe „kompozyt – beton”	439
7.5.	Pomost warstwowy typu PANTURA	451
7.5.1.	Kształtowanie materiałowo-konstrukcyjne panelu pomostu	451
7.5.2.	Badania porównawcze paneli pomostu	454
7.5.3.	Badania wytrzymałościowe panelu pomostu	458
7.5.4.	Ocena nośności i sztywności pomostu na podstawie badań	466
7.6.	Pomost warstwowy typu COMBRIDGE	469
7.6.1.	Kształtowanie materiałowo-konstrukcyjne panelu pomostu	469
7.6.2.	Badania wytrzymałościowe panelu	472
7.6.3.	Ocena nośności i sztywności pomostu na podstawie badań	476
7.7.	Podsumowanie	479
	Piśmiennictwo do rozdziału 7	484
8.	Kształtowanie i badania połączeń w mostach kompozytowych	493
8.1.	Połączenia w dźwigarach kompozytowych	494
8.1.1.	Uwagi ogólne	494
8.1.2.	Połączenia mechaniczne	497
8.1.3.	Połączenia klejowe	505
8.1.4.	Połączenia mieszane	514
8.1.5.	Porównanie połączeń	515
8.2.	Połączenia w pomostach kompozytowych	518
8.2.1.	Uwagi ogólne	518
8.2.1.	Połączenia elementów w panelu	518
8.2.2.	Połączenia „panel – panel”	521
8.2.3.	Połączenia „panel – dźwigar”	526
8.3.	Połączenia w dźwigarach hybrydowych „kompozyt – beton”	537
8.4.	Badania połączeń w mostach kompozytowych	546
8.4.1.	Uwagi ogólne	546
8.4.2.	Połączenie klejowe w dźwigarze kompozytowym	548
8.4.3.	Połączenia klejowe w pomoście kompozytowym	551
8.4.4.	Połączenia sworzniowe w dźwigarze hybrydowym	560
	Piśmiennictwo do rozdziału 8	563
9.	Pierwsze polskie obiekty mostowe z kompozytów FRP	573
9.1.	Kładki dla pieszych	574
9.1.1.	Kładka z kształtowników pultruzyjnych	574
9.1.2.	Kładki z kompozytów warstwowych	576
9.1.3.	Pomost kompozytowy kładki stalowej	579

9.2. Most drogowy typu <i>all-composite</i>	581
9.2.1. Opis mostu	581
9.2.2. Wybrane aspekty projektowania mostu	582
9.2.3. Wytworzenie konstrukcji i budowa mostu	583
9.2.4. Badania mostu	585
9.2.5. System monitoringu konstrukcji kompozytowej	592
9.3. Most drogowy o konstrukcji hybrydowej	595
9.3.1. Opis mostu	595
9.3.2. Wybrane aspekty projektowania mostu	597
9.3.3. Wytworzenie konstrukcji i budowa mostu	599
9.3.4. Badania mostu	602
9.4. Perspektywy rozwoju mostów kompozytowych w Polsce	608
Piśmiennictwo do rozdziału 9	611
Posłowie	617
Wykaz terminów obcojęzycznych	621

Wykaz oznaczeń

Litery łacińskie

- a – parametr regresji, wyznaczany na podstawie badań zmęczeniowych
- $a_{d,i}$ – nominalne wymiary geometryczne elementu
- A_c – pole powierzchni przekroju wycinka laminy
- A_f – pole powierzchni przekroju włókien
- A_m – pole powierzchni przekroju matrycy
- A_1 i A_n – wartości połowy amplitudy drgań własnych (odpowiednio w części początkowej i końcowej wykresu drgań)
- b – szerokość skleiny
- B – charakterystyczne naprężenie niszczące laminat przy 1 cyklu (statyczne)
- d – średnica śruby w połączeniu
- d_0 – średnica otworu na śrubę w połączeniu
- D_x i D_y – płytowe sztywności gięte wycinka płyty w kierunkach globalnych x i y
- D_{xy} – płytowa sztywność skrętna wycinka płyty
- e – odległość otworu od krawędzi laminatu
- E – moduł odkształcalności (sprężystości) podłużnej laminatu
- E_d – obliczeniowa wartość wybranego obciążenia i/lub oddziaływania w postaci uogólnionej siły wewnętrznej
- E_f – moduł odkształcalności podłużnej włókien
- E_m – moduł odkształcalności podłużnej matrycy
- E_k – charakterystyczna wartość wybranego obciążenia i/lub oddziaływania w postaci uogólnionej siły wewnętrznej
- f_{dyn} – ugięcie pod obciążeniem dynamicznym
- f_{st} – ugięcie pod obciążeniem statycznym
- f_{dy} – wytrzymałość kompozytu na ścinanie w płaszczyźnie
- f_{dz} – wytrzymałość kompozytu na ścinanie międzywarstwowe
- F – indeks zniszczenia, stosowany w kryteriach wytrzymałościowych dla wieloosiowego stanu naprężeń (ang. *failure index*)
- F_{crf} – wartość krytycznej siły osiowej we włóknie
- G – moduł odkształcalności (sprężystości) postaciowej (poprzecznej) lamiantu
- G_α – współczynnik uwalniania energii pęknięcia
- G_f – moduł odkształcalności postaciowej włókien
- G_m – moduł odkształcalności postaciowej matrycy

- i, j – główne kierunki ortotropii laminatu
 I_f – moment bezwładności przekroju włókna
 I_x i I_y – momenty bezwładności na zginanie elementów belkowych (np. żebra)
 I_v – moment bezwładności na skręcanie elementu belkowego

 $J(t)$ – podatność na pełzanie

 K_α – współczynnik intensywności naprężeń

 n – liczba drgań w czasie t_s na wykresie drgań konstrukcji
 n_i – liczba cykli obciążenia
 N, N_i – liczba cykli obciążenia do zniszczenia

 Q_d – obliczeniowa wartość obciążenia
 Q_k – charakterystyczna wartość obciążenia
 Q_{ijkl} – elementy macierzy sztywności
 Q_x – siła poprzeczna w kierunku x

 R – współczynnik asymetrii cyklu obciążenia
 R_d – obliczeniowa wartość odpowiedniej nośności i/lub wytrzymałości elementu

 s – przemieszczenie w kierunku podłużnym połączenia, wywołujące poślizg
 S – moment statyczny części przekroju powyżej odpowiedniej osi (płaszczyzny)
 S (też τ_{LT}, f_v) – wytrzymałość warstwy na ścinanie w płaszczyźnie głównych osi materiałowych (1, 2)
 S_{ijkl} – elementy macierzy podatności

 t – grubość warstwy laminy lub laminatu
 t_v – czas trwania obciążenia
 T – okres drgań własnych
 T_g – temperatura zeszklenia żywicy
 T_d – temperatura eksploatacji konstrukcji kompozytowej

 U_f – energia odkształcenia włókna
 U_m – energia odkształcenia matrycy
 U_i – energia inicjacji pęknięcia
 U_p – energia propagacji pęknięcia

 V_f – zawartość objętościowa włókien w laminie i/lub w kompozycie

 w – szerokości laminatu
 W_F – praca sił zewnętrznych

 X_c – wytrzymałość warstwy na ściskanie w kierunku włókien
 X_d – obliczeniowa wartość uogólnionego parametru materiałowego

- X_l – wytrzymałość warstwy na rozciąganie w kierunku włókien
 X_k – charakterystyczna wartość uogólnionego parametru materiałowego
 Y_c – wytrzymałość warstwy na ściskanie w kierunku poprzecznym do włókien
 Y_t – wytrzymałość warstwy na rozciąganie w kierunku poprzecznym do włókien
 z – odległość pomiędzy płaszczyznami środkowymi lamin zewnętrznych

Litery greckie

- α_{ij} – elementy macierzy przejścia
 α'_{ij} – elementy dowolnego tensora po obrocie układu współrzędnych
 α_T – współczynnik rozszerzalności termicznej
 β – współczynnik tłumienia
 $\gamma_{d,ij}$ – odkształcenie obliczeniowe (od ścinania) w płaszczyźnie laminatu
 γ_M – częściowy współczynnik bezpieczeństwa (materiałowy)
 γ_{M1} – współczynnik częściowy uwzględniający niepewności własności materiału
 γ_{M2} – współczynnik uwzględniający niepewności dotyczące wpływu technologii produkcji
 δ – przemieszczenie prostopadłe do powierzchni połączenia, powodujące jego rozwarcie
 ε_l – odkształcenia laminy w kierunku włókien
 $\varepsilon_{d,i}$ – odkształcenia obliczeniowe w kierunku osi i
 ε_{η} – odkształcenia włókien w kierunku włókien
 ε_{m1} – odkształcenia matrycy w kierunku włókien
 ε_{kl} – składowe tensora odkształceń
 η – częstotliwość drgań własnych
 η_c – współczynnik konwersji, charakteryzujący stan i warunki pracy kompozytu
 η_{cf} – współczynnik konwersji uwzględniający wpływ obciążenia zmęczeniowego
 η_{cm} – współczynnik konwersji uwzględniający wpływ wilgoci
 η_{ct} – współczynnik konwersji uwzględniający wpływ temperatury
 η_{cv} – współczynnik konwersji uwzględniający wpływ pełzania
 $\eta_{cv,20}$ – współczynnik konwersji uwzględniający wpływ pełzania (wartość bazowa dla 20 lat)
 $\eta_{i,j}$ – współczynnik wzajemnego oddziaływania I rodzaju (Lechnickiego), uzależniający ścinanie w płaszczyźnie i - j wywołane obciążeniem działającym na kierunku i
 $\eta_{ij,i}$ – współczynnik wzajemnego oddziaływania II rodzaju (Lechnickiego), uzależniający rozciąganie (ściskanie) w kierunku i wywołane ścinaniem w płaszczyźnie i - j

- θ – orientacja włókien, kąt pomiędzy kierunkiem włókien a kierunkiem obciążenia laminatu oraz kąt zawarty między osiami 1 i x (transformacja z układu lokalnego do układu globalnego, zgodnie z rachunkiem macierzowym)
- λ i μ – stałe Lamégo dla materiału izotropowego
- Λ – logarytmiczny dekrement tłumienia
- ν_f – współczynnik Poissona dla włókien
 ν_m – współczynnik Poissona dla matrycy
 ν_{xy} i ν_{yx} – współczynniki Poissona
- ρ – gęstość objętościowa
 ρ_f – gęstość objętościowa włókien
 ρ_m – gęstość objętościowa matrycy
- σ_2 – naprężenia w laminie w kierunku poprzecznym do włókien
 σ_f – wytrzymałość na rozciąganie włókien
 σ_{f2} – naprężenia we włóknach w kierunku poprzecznym do włókien
 σ_{ij} – składowe tensora naprężeń
 σ_m – wytrzymałość na rozciąganie matrycy
 σ_{m2} – naprężenia w matrycy w kierunku poprzecznym do włókien
 σ_{\max} – maksymalne naprężenie cyklu
- ϕ – współczynnik dynamiczny
- ω – masa powierzchniowa tkaniny (gramatura)