

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

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 tłocznego	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

Przegląd konstrukcji mostowych z kompozytów FRP

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

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 użytkowości	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
Postłowie	617
Wykaz terminów obcojęzycznych	621