

ciągną poza zastosowania w różnego rodzaju kompozytach. Włókna te, o średnicach $5\div 16\ \mu\text{m}$ (grubość włosa ludzkiego to maksymalnie $140\ \mu\text{m}$), mają bardzo wysoką wytrzymałość na rozciąganie, ok. $5000\ \text{MPa}$, duży moduł sprężystości, ok. $100\ \text{GPa}$, oraz małe wydłużenie. W związku z tym do przeniesienia obciążeń wystarcza lina o bardzo małym przekroju nośnym. Zalety te spowodowały, że ciężna wykonana z drutów ze szkła kwarcowego zastosowano w obserwatoriach do wykrywania relatywistycznych fal grawitacyjnych Einsteina LIGO w USA (ang. *Laser Interferometer Gravitational Observatory*) i VIRGO we Włoszech. Służą tam ze znakomitym skutkiem do podwieszania luster o masie $40\ \text{kg}$, które pracujących w układach interferometrów laserowych. Zadaniem ciężien jest odseparowanie najbardziej precyzyjnej aparatury pomiarowej, jaka w ogóle została zbudowana, od wpływu zewnętrznych zakłóceń w postaci mikro drgań typu sejsmicznego.

3.7.2. Liny wykonane z włókien sztucznych

Punkt ten opracowano na podstawie publikacji [160], w której zebrano i uporządkowano podstawowe informacje dotyczące lin włókiennych wykonywanych z włókien z tworzyw syntetycznych. Wspomniana publikacja odwołuje się do aktualnych artykułów dotyczących tej problematyki. Jest to stosunkowo nowa dziedzina, ale liczba publikacji rośnie bardzo szybko. Przykładowo, liczba artykułów o linach włókiennych prezentowanych na cyklicznych (co 2 lata) konferencjach światowej organizacji OIPEEC (ang. *International Organization for the Study of the Endurance of Ropes*) wzrosła od 2003 r. z 6% do 42% w 2017r., a wzrost ten jest wykładniczy. Pozostałe artykuły dotyczą lin stalowych. Ciekawostką jest też to, że w 2003 r. organizacja OIPEEC ze swojej poprzedniej nazwy wykreśliła słowo *Wire* i obecnie generalnie zajmuje się wszystkimi linami, *Ropes*, nie tylko linami stalowymi, *Wire Ropes*.

W XX wieku zsyntezowano bardzo wiele nowych materiałów i wytworzono z nich wiele nowych włókien o dużej wytrzymałości na rozciąganie, z których wytwarzane są liny. Najważniejsze daty, wynalazki i nazwy handlowe produktów włókiennych przedstawiono poniżej wg [160]:

- 1935 r. i 1938 r. wynalezienie *nylonu 6.6* i *6* (*poliamid PA*) używanego na linki spadochronowe (DuPont);
- 1941 r. – wynalezienie *poliestru PET* (Anglia) i włókna *dacron* (1950 r. DuPont);
- 1953 r. – wytwarzanie lin z włókien PET;
- 1953 r. – wynalezienie *polietylenu PE* o dużej masie cząsteczkowej i gęstości HMPE;
- 1954 r. – wynalezienie *polipropylenu PP* i zastosowanie go na liny;
- 1965 r. – wynalezienie *aramidu* (rys. 3.61(b)) i *kevlaru* (DuPont);
- 1970 r. – wyprodukowanie włókien o nazwie *kevlar* i lin z tego włókna (1972 r.);
- 1973 r. – wyprodukowanie włókien o nazwie *twaron* (DuPont);

- 1980 r. i 1981 r. – opracowanie włókien *High Modulus Polyethylene* HMPE (*dyneema* i *spectra*);
- 1982 r. – wynalezienie włókien PBO (*zylon*);
- 1988 r. – wynalezienie włókien *Liquid Cristal Aromatic Polyethylene* LCAP (*vettran*) i zastosowanie go w linach (1994 r.).

W tabeli 3.4 zestawiono podstawowe parametry fizyczne (gęstość i temperatura topnienia lub dekompozycji), użytkowe (wydłużenie względne) i wytrzymałościowe (wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości) niektórych włókien naturalnych, włókien syntetycznych i stali wysokowęglowej. Parametry wytrzymałościowe podano zarówno w jednostkach używanych w przemyśle włókienniczym [N/tex], jak i w jednostkach międzynarodowych SI [Pa = N/m²]. Jednostka [tex, teks] jest to tzw. gęstość liniowa włókien naturalnych lub syntetycznych zdefiniowana jako: 1 tex = 1g/km. Aby więc porównać wytrzymałość na zrywanie włókien syntetycznych i naturalnych określonych w jednostkach [N/tex] z jednostkami układu SI [Pa], należy pod uwagę wziąć także gęstość danego tworzywa γ [g/cm³]. W zależności

Tabela 3.4. Porównanie podstawowych parametrów użytkowych i wytrzymałościowych włókien naturalnych, syntetycznych i stali wysokowęglowej [139, 160]

Rodzaj włókna	Masa [g/cm ³]	Temperatura topnienia [°C]	Wytrzymałość na rozciąganie		Wydłużenie ε [%]	Moduł E	
			[mN/tex]	[MPa]		[N/tex]	[GPa]
bawełna	1,5	zapłon 150	300	460	7,0	5,0	8,0
manila	1,3	zapłon ok. 150	530	700	3,0	20,0	30,0
sizal	1,3	zapłon ok. 150	440	580	3,0	20,0	30,0
len	1,5	zapłon ok.150	540	810	3,0	18,0	27,0
konopie	1,5	zapłon ok. 150	470	705	1,8	21,7	32,6
juta	1,5	zapłon ok.150	310	465	2,2	17,2	25,8
nylon	1,1	258	840	960	20,0	7,0	8,0
PET	1,4	258	820	1130	12,0	11,0	15,0
PE	1,0	140	530	500	20,0	4,0	4,0
PP	0,9	165	620	560	20,0	7,0	6,0
aramid (PA)	1,5	500	2000	2900	3,5	60,0	90,0
aramid HMA	1,8	500	–	3200	0,9	–	290,0
TLCP	1,4	330	2200	3100	3,5	55,0	80,0
LCP	1,4	500	–	2400	4,0	–	60,0
HMPE	1,0	150	3500	3400	3,5	100,0	100,0
PBO (zylon)	1,5	650	3650	5800	3,5	–	180,0
druty stalowe	7,9	1600	330	2600	2,0	20,0	160,0

Gdzie: nylon (PA) – poliamid; PET – poliester; PE – polietylen o dużej gęstości; PP – polipropylen; aramid – poliamid sieciowany; HMA – aramid o dużym module sprężystości (ang. *High Modulus Aramid*); TLCP, LCP – polimery ciekłokrystaliczne (ang. *Liquid Crystal Polymer*); HMPE – polietyleny o dużej wartości modułu E (ang. *High Modulus Poly Ethylene*)