

Włókna w balistyce - dziś i jutro

M. Wesołowska, B. Delczyk-Olejniczak

Instytut Technologii Bezpieczeństwa "MORATEX"

Wstęp

Włókna o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie i wysokim module sprężystości zrewolucjonizowały projektowanie lekkich ochron balistycznych. Stały się one podstawowym wzmocnieniem kompozytów stosowanych między innymi w kulo- i odłamkoodpornych hełmach i kamizelkach oraz opancerzeniach pojazdów. Dostępność materiałów z niezrównanie wytrzymałych włókien przekraczających możliwości dostępnych w danym czasie surowców konstrukcyjnych pobudzało wyobraźnię wielu konstruktorów. Zaprezentowano mnóstwo pomysłów nowych zastosowań oraz kreatywne rozwiązania istniejących problemów. Jednakże niewiele obszarów zastosowań zostało zrewolucjonizowanych w takim stopniu, jak środki ochrony osobistej, głównie lekkie kamizelki, które szybko zastąpiły stare ciężkie i sztywne konstrukcje stalowe. Większość zastosowań wysokowytrzymałych włókien to: ergonomiczne, dopasowujące się środki ochrony osobistej, opancerzenia pojazdów, helikopterów, łodzi patrolowych oraz przenośne schrony (budynki dowodzenia).

1. Włókna stosowane w balistyce

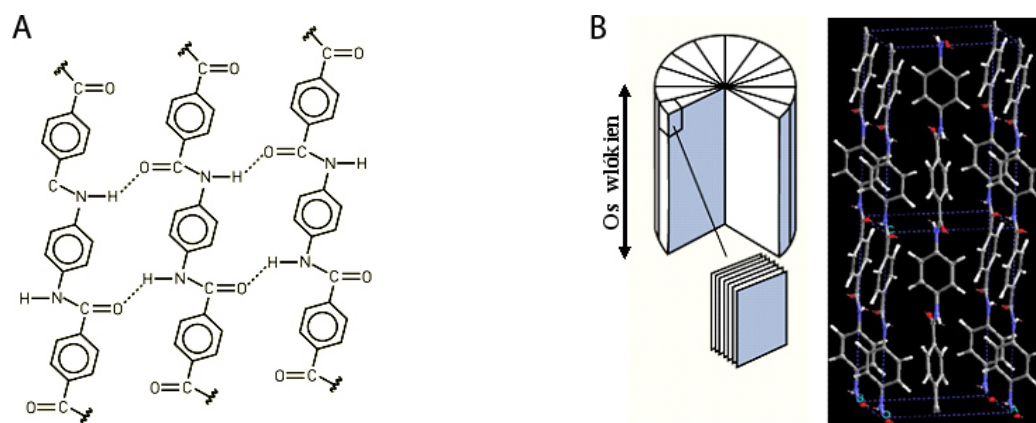
Dzisiejszy stan wiedzy na temat lekkich osłon balistycznych bazuje na wysokowytrzymałych materiałach organicznych oraz nieorganicznych. Włókna używane w balistyce charakteryzują się małą gęstością, wysoką wytrzymałością na rozciąganie i wysoką zdolnością absorpcji energii. Powszechnie stosuje się wysokowytrzymałe włókna para-aramidowe (Kevlar®, Twaron®), włókna polietylenowe (HPPE) (Dyneema®, Spectra®), włókna szklane (S-2 Glass®). Jako ostatnie na rynek wprowadzone zostały produkty balistyczne bazujące na włóknach PBO (Zylon®) [1].

1.1. Włókna para-aramidowe

Po raz pierwszy włókna aramidowe zostały otrzymane w 1965 roku przez naukowców z firmy DuPont. Surowcem tworzącym włókna jest długi łańcuch poliamidowy z co najmniej 85-procentowym udziałem grup amidowych (NHCO) połączonych bezpośrednio z dwoma pierścieniami benzenu. Stąd też nazwa

włókien aramidowych pochodzi od skrótu poliamidów aromatycznych. Między łańcuchami występują silne oddziaływania międzycząsteczkowe (wiązania wodorowe) utworzone między polarnymi grupami amidowymi (Rysunek 1 a). Włókna aramidowe są formowane ze stopu polimeru ciekłokrystalicznego, wykazują wysoki stopień uporządkowania cząsteczek. Były one pierwszymi włóknami organicznymi o tak wysokiej wytrzymałości na rozciąganie i module sprężystości. Pierwotnie miały zastąpić stal w oponach radialnych, jednak zastosowano je z dużym powodzeniem w kompozytach o specjalnych właściwościach. Obecną postać włókien aramidowych i ich wysokie właściwości wytrzymałościowe osiągnięto dzięki strukturze łańcucha głównego, grupy amidowe występują w pozycji 1,4 względem pierścienia benzenu (para), zaś pierścienie aromatyczne zapewniają stabilność termiczną. Grupy aromatyczne w strukturze polimeru mają ułożenie promieniowe (Rysunek 1 b), co zapewnia wysoki stopień symetrii i regularności względem wewnętrznej struktury włókien. Regularność (porównywalna do obserwowanej w kryształach) jest jednocześnie czynnikiem decydującym o wytrzymałości włókien para-aramidowych.

Najczęściej w osłonach balistycznych stosowane są włókna para-aramidowe Kevlar® produkowane przez DuPont oraz Twaron® produkcji Teijin. Włókna te otrzymywane są z roztworu fazy mezomorficznej polimeru w stężonym kwasie siarkowym. W Tabeli 1 przedstawiono analizę porównawczą wybranych właściwości włókien aramidowych. Włókna te mają pięć razy większą wytrzymałość na rozciąganie od stali – przy takiej samej masie, a różnica ta wzrasta sześciokrotnie w wodzie. Wynik ten jest spowodowany ich małą gęstością, która jest około połowę mniejsza od gęstości szkła. Moduł i wytrzymałość na rozciąganie są porównywalne do wysokowytrzymałych włókien szklanych S-2 Glass®. Ujemny współczynnik rozszerzalności cieplnej ($2 \div 5 \times 10^{-6}$ K⁻¹ [3,4]) sprawia, że włókna para-aramidowe są stabilne termicznie [5], nie topią się, a temperatura rozkładu w powietrzu wynosi ok. 450°C. Są odporne na działanie płomienia, po odstawieniu źródła ognia przestają się palić. Niskie temperatury (ok. -50°C) nie wpływają na właściwości wytrzymałościowe. Wykazują dobrą odporność na działanie większości środków chemicznych,



Rysunek 1. Struktura chemiczna włókien para-aramidowych (a); wewnętrzna orientacja łańcuchów polimeru we wnętrzu włókna (b) [2]

poza silnymi kwasami (kwas mrówkowy, kwas solny) i zasadami (wodorotlenek sodu, podchloryn sodu). Włókna aramidowe o małym wydłużeniu przy zerwaniu oraz dużym module sprężystości wykorzystywane są szczególnie w obszarach wymagających dużej odporności na uderzenia (udarności) i ścieranie, takich jak: opancerzenia i środki ochrony osobistej, kable, liny, olinowanie łodzi, spadochrony.

Niestety większość włókien aramidowych jest wrażliwa na działanie promieniowania UV, które zmienia naturalny kolor i wytrzymałość włókien przy długotrwałej ekspozycji. Co więcej, charakteryzują się również dużą absorpcją wilgoci. Wysoce anizotropowa struktura włókien aramidowych odpowiada za ich słabe właściwości mechaniczne w innych kierunkach niż wzdłużny, co w konsekwencji objawia się m.in. słabą wytrzymałością na ściskanie. Tkaniny wykonane z włókien aramidowych są bardzo trudne do cięcia, a laminaty na bazie włókien aramidowych wymagają specjalnych maszyn tnących.

Wyjątkowe właściwości włókien aramidowych wyróżniają je spośród innych komercyjnych włókien syntetycznych, dzięki czemu znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Stosowane są m.in. do wytwarzania:

- Panczerzy i osłon balistycznych,

- Lin zabezpieczających poduszki powietrzne w urządzeniach niezbędnych do lądowania na Marsie,
- Lekkich lin o małej średnicy (wytrzymujących do 10 ton), pomagających cumować największe statki marynarki wojennej,
- Kuloodpornych osłon silników samolotów,
- Opon odpornych na przebicie,
- Rękawic chroniących dłoń i palec przed przecięciami, oparzeniami i innymi urazami,
- Kajaków, które zapewniają lepszą odporność na uderzenia przy niższej wadze,
- Mocnych, lekkich nart, kasków i rakiet.

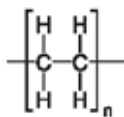
1.2. Włókna polietylenowe

Włókna Spectra® firmy Honeywell oraz Dyneema® firmy DSM są wykonywane z polietylenu o ultra-wysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE), zwanego także polietylenem o wysokim module (HMPE) lub polietylenem o wysokiej wydajności (HPPE). Składa się on z bardzo długich łańcuchów, jego masa molowa wynosi od 3 do 10 milionów g/mol. Budowę chemiczną polietylenu UHMWPE przedstawia rysunek 2. Gęstość polietylenu jest mniejsza niż 1 g/cm³. Długie, wysoce zorientowane łańcuchy polimeru skutecznie

Tabela 1. Właściwości włókien aramidowych [6]

Parametr	Gęstość	Moduł elastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Wydłużenie przy zrywaniu
	g/cm ³	GPa	GPa	%
Technora	1,39	70	3,0	4,4
Twaron	1,45	121	3,1	2,0
Kevlar 29	1,44	70	3,0	4,2
Kevlar 129	1,44	96	3,4	3,5
Kevlar 49	1,44	113	3,0	2,6
Kevlar KM2	1,44	70	3,3	4,0

przenoszą obciążenia, tworząc lekki materiał o wysokiej wytrzymałości, odporny na uderzenia.



Rysunek 2. Budowa chemiczna włókien polietylenowych [7]

Włókna polietylenowe są 10 razy bardziej wytrzymałe niż stal, bardziej trwałe od poliestru i mają o 40 % wyższą wytrzymałość na rozciąganie niż włókna aramidowe. Włókna te mają niezwykle dużą udarność, a dzięki dużej zdolności pochłaniania energii są odpowiednie do zastosowań na ochrony balistyczne. Oznaczają się doskonałą elastycznością i odpornością na ścieranie. Hydrofobowy charakter czyni je nadzwyczaj odpornymi na wodę. Włókna te mają najwyższy współczynnik wytrzymałości do masy, co jest kluczowe przy produkcji lekkich osłon osobistych. Są one odporne na działanie środków chemicznych (poza kwasami utleniającymi) i promieniowania UV [8].

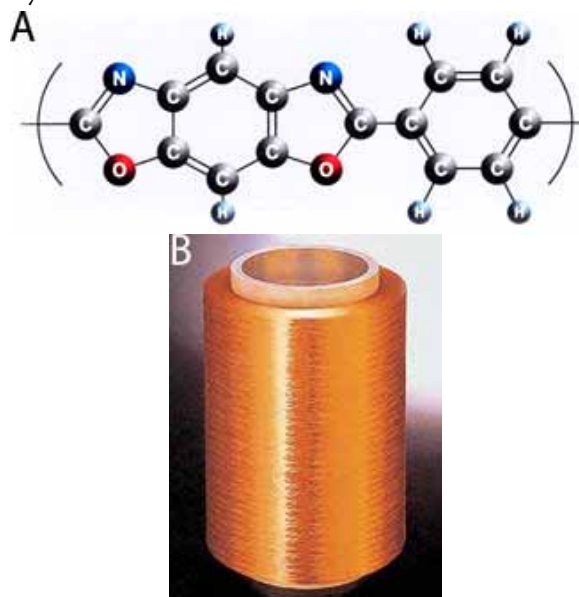
Słabe wiązania pomiędzy cząsteczkami olefin predestynują do lokalnych wzbudzeń termicznych zakłócających strukturę krystaliczną danego łańcucha, przez co odporność na wysoką temperaturę włókien polietylenowych jest znacznie mniejsza niż innych włókien o wysokiej wytrzymałości. Temperatura topnienia UHMWPE wynosi około 144÷152°C, co sprawia iż nie jest zalecane długotrwałe stosowanie włókien w temperaturze powyżej 80°C. W niskich temperaturach (poniżej -150°C) włókna stają się kruche. Kolejną cechą włókien polietylenowych jest zjawisko pełzania polimeru. Po przyłożeniu obciążenia, nawet w temperaturze pokojowej, HPPE ulega deformacji. Ze względu na słabe połączenie z większością powierzchni spowodowane przez niską energię powierzchniową i obojętność chemiczną, polietylen ma ograniczoną ilość zastosowań do laminatów.

Podstawowe właściwości włókien polietylenowych o ultra-wysokiej masie cząsteczkowej przedstawiono w tabeli 2.

Włókna z polietylenu o ultra-wysokiej masie cząsteczkowej wprowadzone na rynek w późnych latach 70-tych są szeroko stosowane w ochronach balistycznych, tj. kamizelkach kulo- i odłamkooodpornych, hełmach, opancerzeniach pojazdów i do produkcji lekkich ochron osobistych. Włókna HMPE są także wykorzystywane w produktach medycznych ze względu na ich biogodność, np. jako implanty stawów. Znajdują zastosowanie w przemyśle sportowym, tj. narciarstwo, snowboard, hokej, łyżwiarstwo, wspinaczka, spadochroniarstwo, wędkarstwo, żeglarstwo. Na dużą skalę stosuje się je do produkcji lin, wykorzystywanych na statkach i okrętach, sieci w rybołówstwie, rękawic ochronnych przeciw otarciom i skaleczeniom.

1.3. Pozostałe włókna balistyczne

W latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku na Uniwersytecie Stanforda została opracowana technologia wytwarzania włókien z poli(p-fenyleno-2,6-benzobisoksazolu) (PBO) (Rysunek 3). Włókna zostały wprowadzone do produkcji przez japońską firmę Toyobo Corporation i nadano im nazwę handlową Zylon®.



Rysunek 3. Włókno balistyczne Zylon® (a) budowa chemiczna, (b) szpula z włóknem [11]

Tabela 2. Właściwości włókien polietylenowych Dyneema® [9] i Spectra® [10]

Parametr	Gęstość	Moduł elastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Wydłużenie przy zrywaniu
	g/cm ³	GPa	GPa	%
Dyneema SK60	0,97	89	2,7	3,5
Dyneema SK65	0,97	95	3,0	3,6
Dyneema SK66	0,97	99	3,2	3,7
Spectra 900	0,97	73	2,4	2,8
Spectra 1000	0,97	103	2,8	2,8
Spectra 2000	0,97	124	3,3	3,0

Włókna Zylon® posiadają dwukrotnie większą wytrzymałość na rozciąganie niż Kevlar® oraz dwukrotnie większy moduł sprężystości przy rozciąganiu. Zylon® odznacza się bardzo wysoką odpornością na działanie ognia, pali się jedynie przy zawartości tlenu powyżej 68 % a taka ilość nie jest spotykana w naturalnych warunkach atmosfery ziemskiej [12]. Charakteryzuje się wysoką stabilnością termiczną, ulega rozkładowi w temperaturach powyżej 650°C. Włókna PBO wyróżniają się również doskonałą odpornością na ścinanie i ścieranie. Wykazują doskonałą odporność chemiczną i stabilność wymiarów w warunkach wilgotności, przy jednoczesnym niskim współczynniku pochłaniania wilgoci na poziomie ok. 0,6 % [11]. Charakteryzują się niestety ekstremalnie dużą wrażliwością na działanie światła w zakresie UV i światła widzialnego, wskutek czego produkowane włókna muszą być nawijane na bębny w ciemności. Wytrzymałość włókien maleje dwukrotnie już po 100 godzinach ekspozycji na światło UV. Z tego powodu stosowanie produktów z włóknami Zylon® wymaga bardzo dobrego zabezpieczenia materiałem pokryciowym.

Wyróżnia się dwa rodzaje włókien Zylon®, AS (ang. as spun - jak przędza) oraz HM (ang. high modulus - wysokomodulowe). Ich właściwości przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Właściwości włókien Zylon®

Właściwości		Zylon AS	Zylon HM
Tex włókna	dtex	1,7	1,7
Gęstość	g/cm ³	1,54	1,56
Absorpcja wilgoci (65%)	%	2,0	0,6
Wytrzymałość na rozciąganie	GPa	5,8	5,8
	(cN/dtex)	37	37
Moduł przy rozciąganiu	GPa	180	270
	(cN/dtex)	1150	1720
Wydłużenie przy zerwaniu	%	3,5	2,5
Temperatura rozkładu w powietrzu	°C	650	650
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	°C ⁻¹	-	-6 * 10 ⁻⁶
Graniczny indeks tlenowy		68	68
Stała dielektryczna przy 100kHz			3,0
Współczynnik rozproszenia			0,001

Włókna Zylon® są wytwarzane w formie włókien ciągłych, ciętych lub staplowych, nitki wyczeskowej, tkaniny, dzianiny i pulpy. W tych formach wykorzystywane są jako półprodukty m.in. do produkcji artykułów sportowych (rakiety tenisowe, kije golfowe), lin wysokiego napięcia, kabli i mechanizmów wykorzystywanych w przestrzeni kosmicznej oraz produktów ochronnych, takich jak odzież ochronna, hełmy, rękawice odporne na przecięcia i kamizelki kuloodporne.

Mimo doskonałych właściwości włókien PBO, ich stosowanie w ochronach balistycznych budzi kontrowersje. Stwierdzono utratę zdolności ochronnych kamizelek kuloodpornych wykonanych z udziałem włókien Zylon® z upływem czasu. Jednak nie zniechęciło to niektórych producentów do stosowania ich w osłonach balistycznych (np. Armor Holdings (Safariland and American Body Armor), DHB (Point Blank), First Choice, Gator Hawk, PSP PT Armor) [12].

Kolejny rodzaj włókien stosowanych w balistyce to wysokowytrzymałe włókna szklane S-Glass. Są one włóknami wykonanymi z glinowokrzemowego szkła zawierającego znaczną ilość tlenku magnezu. Znajdują zastosowanie nie tylko w balistyce, pozwalając na obniżenie kosztów gotowego wyrobu.

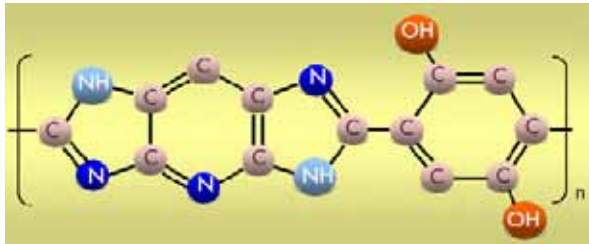
Włókna szklane S wyróżnia przede wszystkim wysoka wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie przy zachowaniu wysokiej trwałości i niezawodności. Włókna te odznaczają się dużą stabilnością nawet w wysokich temperaturach. Są odporne na czynniki środowiskowe, środki chemiczne, ogień i dym [13]. Jednocześnie odznaczają się „przezroczystością” dla radarów, są lżejsze od tradycyjnych włókien szklanych i tańsze od włókien paraaramidowych, co jest dodatkowym atutem w zastosowaniach balistycznych [14].

W porównaniu do tradycyjnego szkła E, włókna szklane S charakteryzuje:

- 30÷40 % większa wytrzymałość na rozciąganie,
- 16÷20 % większy moduł sprężystości,
- 45 % wyższa energia odkształcenia,
- 30 % niższy współczynnik rozszerzalności liniowej,
- 100÷150 °C większa odporność na wysoką temperaturę,
- 10 razy większa odporność na zmęczenie,
- wyższa odporność na korozję [15],
- mniejsza masa przy tych samych właściwościach [16].

Włókna S-Glass wykorzystywane są do produkcji wysokowytrzymałych kompozytów, elementów konstrukcyjnych samolotów, helikopterów, samochodów, łodzi, zbiorników ciśnieniowych, zbiorników paliwa. Ze względu na wysoką odporność w szerokim zakresie temperatur, są używane jako izolacje kabli i elementy izolacyjne w piecach. Stosuje się je także w przemyśle sportowym: w żeglarstwie, narciarstwie, snowboardzie, surfingu, łucznictwie. Najczęściej stosowanymi w osłonach balistycznych włóknami szklanymi, są tzw. włókna S-2 Glass® produkowane przez firmę AGY [17]. Znajdują one zastosowanie głównie w opancerzeniach pojazdów i obiektów stałych.

Ostatnimi opisywanymi w tym artykule włóknami do zastosowań balistycznych są włókna MS[®] o ultra-wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, otrzymane w laboratoriach Akzo Nobel i produkowane przez Magellan Systems International przy współpracy z DuPont. Włókna MS[®] tworzy sztywny łańcuch poli[2,6-[(4,5-b:4',5') diimidazolo]pirydynyleno-2,5-dihydroksy-1,4-fenylen]-u (PIPD) (Rysunek 4), a dodatkowo pomiędzy sąsiednimi łańcuchami występują silne wiązania wodorowe.



Rysunek 4. Budowa chemiczna włókien MS[®].

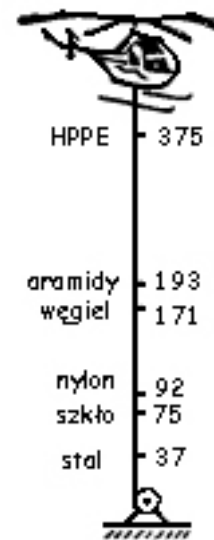
Włókna MS[®] to potencjalna alternatywa o ultra-wysokiej wytrzymałości, ultra-wysokiej odporności termicznej oraz odporności na płomień dla produktów z aktualnie dostępnych na rynku wysokowytrzymałych włókien. Włókna te nie palą się nawet w drastycznych warunkach, są odporne na pirolizę, wykazują wyższą odporność na płomień niż włókna aramidowe [18]. Włókna PIPD nie degradują pod wpływem wody, kwasów lub promieniowania ultrafioletowego. Ich powierzchnia jest łatwo zwilżalna przez żywicę, co pozwala na ich stosowanie w kompozytach [19]. Są to jedne z najbardziej obiecujących materiałów do zastosowania w środkach ochrony osobistej, opancerzeniach pojazdów i ochronach ognioodpornych, jak również kompozytach strukturalnych. Technologia z zastosowaniem tych włókien może wprowadzić radykalną poprawę właściwości miękkich i twardych osłon balistycznych, takich jak kamizelki kulo- i odłamko odporne, hełmy, kompozyty do opancerzania pojazdów i statków powietrznych, ochrony przed ogniem i inne [20]. Z wstępnych badań wynika, iż odłamko odporne kompozyt na bazie włókien MS[®] zmniejszy masę powierzchniową docelowego elementu balistycznego o ok. 40÷60 % w stosunku do elementu na bazie włókien Kevlar[®], przy zachowaniu tego samego poziomu ochrony [21]. Obecnie włókna MS[®] wykazują uśredniony moduł sprężystości na poziomie 310 GPa, uśrednioną wytrzymałość na rozciąganie dochodzącą do 5,8 GPa, jednak wyższą niż włókna aramidowe (Kevlar[®], Twaron[®]), na poziomie włókien PBO (Zylon[®]). Wielu przedstawicieli wysokowytrzymałych włókien mogłoby obecnie konkurować z włóknami MS[®] pod względem pojedynczych właściwości, jednak żadne z nich nie łączą wszystkich cech włókien MS[®].

Jak do tej pory nie osiągnięto jeszcze zakładanych, teoretycznie wyliczonych wartości właściwości włókien MS[®], takich jak:

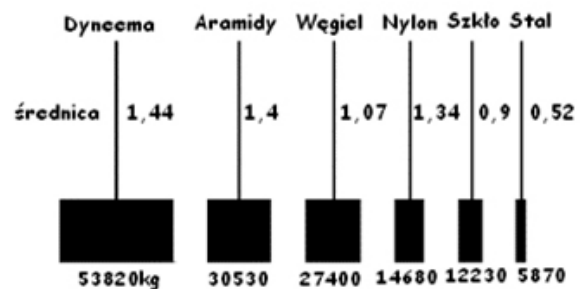
- moduł sprężystości przy rozciąganiu 450 GPa,
 - wytrzymałość na rozciąganie 9,5 GPa,
 - wydłużenie przy zerwaniu 2,0÷2,5 % [22],
- a technologia wytwarzania włókien jest stale dopracowywana. Dostępne wyniki badań wskazują, że może być to najlepsze włókno o przeznaczeniu balistycznym jakie pojawiło się kiedykolwiek na świecie.

Porównanie właściwości włókien

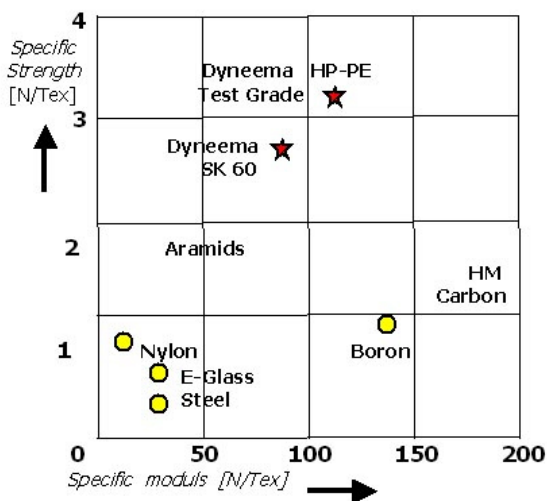
Wytrzymałość na rozciąganie różnego rodzaju włókien w sposób poglądowy ilustrują rysunki 5÷7. Na rysunku 5 podano długość w km, przy której linę z określonego materiału zrywa się pod własnym ciężarem, natomiast na rysunku 6 przedstawiono wytrzymałość i średnice lin z tych materiałów, mających jednakowy tex wynoszący 160 000 [23].



Rysunek 5. Długość w km, przy której linę z określonego materiału zrywa się pod własnym ciężarem [23]



Rysunek 6. Wytrzymałość i średnice lin z różnych materiałów mających jednakowy tex równy 160 000 [23]

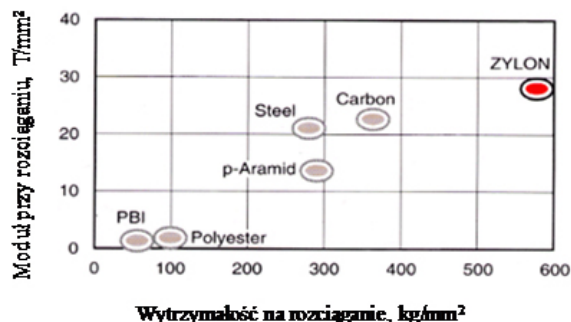


Rysunek 7. Wykres ilustrujący wytrzymałość właściwą i moduły sprężystości włókien z różnych materiałów [24]

Na podstawie przedstawionych danych można stwierdzić, że włókna Dyneema® wyróżniają się spośród innych wysokowytrzymałych włókien stosowanych w balistyce nie tylko swoją wyjątkowo małą gęstością ale również bardzo wysoką wytrzymałością właściwą i modułem przy rozciąganiu.

Na szczególną uwagę zasługują również włókna Zylon®, charakteryzujące się najwyższą spośród wszyst-

kich wysokowytrzymałych włókien wytrzymałością na rozciąganie i modułem przy rozciąganiu (Rysunek 8).



Rysunek 8. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie i modułu przy rozciąganiu dla różnych włókien [25]

Włókna Zylon® posiadają również bardzo wysoki wskaźnik wytrzymałości do masy włókna - wynoszący 3,7, podczas gdy wskaźnik ten w innych włóknach wynosi odpowiednio: dla włókien Spectra® - 3,0; dla Dyneema® - 2,5; dla Kevlar® - 2,1; dla Twaron® - 2,5 oraz dla porównania dla stali - 0,1 [26].

Porównanie podstawowych właściwości włókien Zylon® z właściwościami innych wysokowytrzymałych włókien zawiera tabela 4.

Tabela 4. Porównanie właściwości fizyko-mechanicznych włókien Zylon® i innych włókien [27]

	Wytrzymałość na rozciąganie		Moduł przy rozciąganiu		Wydłużenie	Gęstość	Absorpcja wilgoci	Graniczny indeks tlenowy	Odporność cieplna*
	cN/tex	GPa	cN/tex	GPa					
Zylon AS	37	5,8	1150	180	3,5	1,54	2,0	68	650
Zylon HM	37	5,8	1720	270	2,5	1,56	0,6	68	650
p-Aramid (HM)	19	2,8	850	109	2,4	1,45	4,5	29	550
m-Aramid	4,5	0,65	140	17	22	1,38	4,5	29	400
Włókno stalowe	3,5	2,8	290	200	1,4	7,8	0		
HS-PE	35	3,5	1300	110	3,5	0,97	0	16,5	150
PBI	2,7	0,4	45	5,6	30	1,4	15	41	550
Poliester	8	1,1	125	15	25	1,38	0,4	17	260

* - temperatura topnienia lub rozkładu

Tabela 5. Porównanie opancerzenia na bazie włókien S-2 Glass® do opancerzeń z alternatywnych materiałów [28]

Opancerzenie na bazie włókien S-2 Glass® względem:		
materiału wzmocnionego włóknami aramidowymi	materiału wzmocnionego wł. polietylenowymi (UHMWPE)	stali lub aluminium
<ul style="list-style-type: none"> • jednakowa ochrona balistyczna przy zbliżonej wadze • niższe koszty gotowego wyrobu • cieńsze elementy • łatwiejsza produkcja i wykończenie • większa stabilność kształtu • zdolność zmniejszenia deformacji podłoża • większa odporność na degradację pod wpływem warunków atmosferycznych (UV, wilgotność) 	<ul style="list-style-type: none"> • niższe koszty gotowego wyrobu • odporność na ogień • cieńsze elementy • łatwiejsza produkcja i wykończenie • znacząca poprawa stabilności kształtu • zdolność zmniejszenia deformacji podłoża • większa odporność na degradację pod wpływem warunków atmosferycznych 	<ul style="list-style-type: none"> • mniejsza waga • wyższy poziom ochrony balistycznej • odporność na korozję • łatwiejsza produkcja • wzmocnienie elementów • niska stała dielektryczna • niższy współczynnik przewodnictwa cieplnego • niższe koszty gotowego wyrobu

Tabela 6. Porównanie włókien balistycznych z włóknem przyszłości M5[®] [6, 29]

Parametr	Gęstość	Moduł elastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Wydłużenie przy zrywaniu
	g/cm ³	GPa	GPa	%
Twaron [®]	1.45	121	3.1	2.0
Dyneema [®]	0.97	87	2.6	3.5
Włókna węglowe T-300	1.76	231	3.8	1.8
S-Glass	2.48	90	4.4	5.7
Zylon [®] AS	1.54	180	5.8	3.5
M5 [®] (próbka 2001)	1.7	271	4.0	1.4
M5 [®] (docelowe)	-	450	9.5	2.5

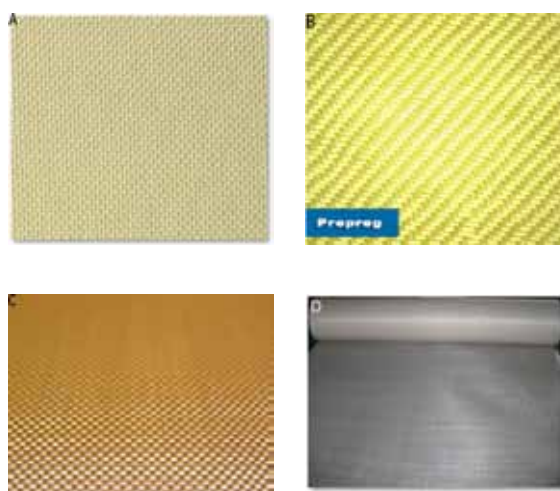
Producent włókna S-2 Glass[®] stara się przekonać wytwórców elementów balistycznych do stosowania ich w różnych systemach ochron. Porównanie opancerzeń z włókien S-2 Glass[®] względem opancerzeń na bazie włókien aramidowych, włókien polietylenowych o wysokiej masie cząsteczkowej oraz opancerzeń ze stali lub aluminium zawiera tabela 5.

Włókna M5[®] charakteryzują się dużą wytrzymałością na rozciąganie oraz najwyższym modułem elastyczności w porównaniu z innymi rodzajami włókien przedstawionymi w tabeli 6.

3. Surowce balistyczne

Surowce balistyczne otrzymywane z włókien przedstawionych w tabeli 6 są dostępne na światowych rynkach między innymi w postaci:

- tkanin z włókien para-aramidowych typu Kevlar[®] lub Twaron[®] (Rysunek 9 a),
- jednostronnych lub dwustronnych preimpregnatów na bazie tkanin z włókien para-aramidowych i żywicy polimerowych lub mieszanek gumowych (zawartość spoiwa ~12÷18%) (Rysunek 9 b),
- powlekanych tkanin z tasiemek polietylenowych,
- tkanin z wysokowytrzymałych włókien szklanych S-2 Glass[®],
- tkanin z włókien Zylon[®] (Rysunek 9 c),
- nietkanych wyrobów z włókien polietylenowych, jednokierunkowych UD (Unidirectional), zbudowanych zbudowanych z czterech warstw o orientacji 0°/90°/0°/90° z równoległe ułożonych włókien Dyneema[®] lub Spectra[®], połączonych ze sobą termoplastyczną matrycą (Rysunek 9 d):
- nietkanych wyrobów z włókien para-aramidowych jednokierunkowych UD, zbudowanych z czterech warstw o orientacji 0°/90°/0°/90° z równoległe ułożonych włókien para-aramidowych, połączonych za pomocą termoplastycznej folii (np. Gold Flex[®] produkcji amerykańskiej firmy Honeywell International Inc. [30], rysunek 10).



Rysunek 9. Zdjęcia przykładowych surowców balistycznych (a) tkanina z włókien para-aramidowych Kevlar[®] lub Twaron[®], (b) preimpregnat na bazie tkaniny z włókien para-aramidowych i żywicy polimerowej, (c) tkanina z włókien Zylon[®], (d) nietkany wyrób na bazie włókien polietylenowych.



Rysunek 10. Budowa balistycznego materiału kompozytowego Gold Flex[®] [31]

Tkaniny z wysokowytrzymałych włókien szklanych są kompatybilne z żywicami epoksydowymi i estrami winylowymi. Wytwarzane są o splotach: płóciennym, skośnym oraz satynowym w grubości 0.08÷0.30 mm i zerokość od 90 cm. Tkaniny z wysokowytrzymałych włókien szklanych są idealnym wzmocnieniem włóknistym dla przemysłu lotniczego, morskiego, zbrojeniowego [32].

4. Rozwiązania konstrukcyjne z udziałem materiałów na bazie scharakteryzowanych włókien

Wysiłki producentów ochron balistycznych wytwarzanych głównie z kompozytów włóknistych otrzymywanych na bazie włókien para-aramidowych i polietylenowych zmierzają w kierunku:

- zminimalizowania masy wyrobów,
- zwiększenia odporności na oddziaływanie warunków atmosferycznych,
- zmniejszenia zagrożenia odpryskami po ostrzale.

Materiały z włókien para-aramidowych lub polietylenowych (polietylen UHMW) w postaci wielowarstwowych, zszywanych pakietów tworzą tzw. miękkie osłony balistyczne (kamizelki kuloodporne, maty przeciwdławkowe) zaś w postaci sprasowanych kompozytów z matrycą polimerową tworzą sztywne osłony balistyczne (hełmy ochronne, tarcze, pancerze).

Surowcem do wykonywania kompozytowych, sztywnych osłon balistycznych są zazwyczaj gotowe preimpregnaty. Dla włókien para-aramidowych są to zwykle specjalne, warstwowe preimpregnaty z żywicą polimerową bądź mieszanką gumową (zawartość spoiwa tworzącego warstwę na powierzchni tkaniny wynosi około 15%); włókna polietylenowe są dostarczane jako preimpregnat PE/PE.

Poniżej przedstawione zostaną przykładowe rozwiązania konstrukcyjne oraz materiały stosowane do ich wykonania.

Kamizelki kulo- i odłamkoodporne najczęściej wykonane są z:

- nietkanego wyrobu polietylenowego,
- nietkanego wyrobu z włókien para-aramidowych,
- tkanin z włókien para-aramidowych,
- tkanin z włókien Zylon®.



Rysunek 11. Przykładowe kamizelki ochronne (a) lekka kamizelka wewnętrzna kulo-, nożo- i igłoodporna konstrukcji ITB „Moratex” [33], (b) policyjna kamizelka taktyczna DRAGON FIRE firmy Point Blank, (c) kamizelka kuloodporna SKORPION konstrukcji konsorcjum Lubawa SA & Janysport [34]

Twarde wkłady balistyczne, stosowane jako element dodatkowy kamizelek kulo- i odłamkoodpornych najczęściej wykonywane są z:

- nietkanego wyrobu polietylenowego (Rysunek 12 a),

- prepregu na bazie włókien para-aramidowych (Rysunek 12 b),
- kompozytu polietylenowego połączonego z ceramiką,
- ceramiki,
- stali balistycznej



Rysunek 12. Przykładowe wkłady balistyczne (a) wkład polietylenowy firmy Kata, (b) wkład para-aramidowy High-Temp TM [35], płyty ceramiczne typu SAPI [36]

Hełmy balistyczne wykonywane są głównie z:

- prepregu na bazie włókien para-aramidowych,
- prepregu na bazie włókien polietylenowych UHMW (Rysunek 13 c).



Rysunek 13. Przykładowe hełmy balistyczne (a) hełm DIAMOND lite TM PASGT firmy Point Blank [37], (b) hełm kulo- i odłamkoodporny HB ITB „Moratex” [35], hełm GTH-01 PASGT firmy Gotye [38]

Najpowszechniej stosowanym hełmem kompozytowym (z tkanin aramidowych) jest amerykański model o nazwie PASGT [39]. Dostępne są również chińskie odmiany modelu PASGT wykonywane z nietkanego wyrobu z włókien polietylenowych o wysokiej masie cząsteczkowej (UHMW).

Tarcze balistyczne wykonywane są z:

- nietkanego wyrobu polietylenowego,
- prepregu na bazie włókien para-aramidowych,
- stali balistycznej.



Rysunek 14. Przykładowe tarcze (a) tarcza kuloodporna z wizjerem TK/Pls 04 konstrukcji ITB „Moratex” [35], (b) amerykańska wojskowa tarcza do zadań taktycznych [40], (c) amerykańska tarcza balistyczna na kółkach do działań w trudnym terenie [41]

Opancerzenia środków transportu wykonuje się najczęściej z:

- nietkanego wyrobu polietylenowego,
- prepregu na bazie włókien para-aramidowych,
- tkanin szklanych,
- kompozytu polietylenowego połączonego z ceramiką (Rysunek 15 a),
- stali balistycznej.



Rysunek 15. Przykładowe opancerzenia środków transportu (a) opancerzony transporter, (b) opancerzony śmigłowiec [42], (c) opancerzony pojazd dla VIP-ów [43]

Podsumowanie

W artykule zostały przedstawione najistotniejsze właściwości włókien o wysokiej wytrzymałości, stosowanych do celów balistycznych, włókien para-aramidowych Kevlar® i Twaron®, polietylenowych o ultra-wysokiej masie cząsteczkowej Dyneema® i Spectra®, włókien szklanych S-2 Glass® oraz włókien typu Zylon® i M5®. Włókna te charakteryzują się małą gęstością, wysoką wytrzymałością i wysoką zdolnością absorpcji energii.

Włókna para-aramidowe wyróżnia niepalność, stabilność termiczna i wysokie wskaźniki ochrony balistycznej. Zaletami włókien Dyneema® jest dobra odporność na promieniowanie UV i chemikalia, nieograniczona w czasie trwałość materiałów do przetwórstwa oraz mniejszy ciężar w stosunku do osłon para-aramidowych o tym samym stopniu ochrony balistycznej. Materiały te są niestety palne. Włókna Zylon® wyróżnia świetna odporność na ścinanie i ścieranie. Niestety są bardzo wrażliwe na światło widzialne i UV. Z kolei włókna szklane S-2 Glass® wyróżnia przede wszystkim wysoka wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie przy zachowaniu wysokiej trwałości i niezawodności. Poza tym odznaczają się „przeźroczystością” dla radarów.

Przedstawione w artykule włókna posiadają zatem zarówno zalety jak i wady. Producent lub projektant konkretnego wyrobu balistycznego musi zdecydować, która z cech jest dla niego najistotniejsza w danym zastosowaniu. Nie zawsze będzie to najwyższa wytrzymałość czy moduł sprężystości, czasem przeważać może kwestia masy wyrobu czy też jednostkowa cena.

Przedstawione zostały przykładowe rozwiązania konstrukcyjne na bazie materiałów z omówionych wysokowytrzymałych włókien, m.in. kamizelki kuloodporne, twarde wkłady balistyczne, hełmy i tarcze balistyczne a także opancerzenia środków transportu.

Literatura

1. M. J. N. Jacobs, J. L. J. Van Dingenen "Ballistic protection mechanisms in personal armour", *Journal of Materials Science* 36 (2001) 3137 – 3142, DSM High Performance Fibers, Eisterweg 3, 6422 PN Heerlen, The Netherlands
2. Technical Guide - Kevlar aramid fiber, materiały informacyjne firmy DuPont, http://www2.dupont.com/Kevlar/en_US/
3. Materiały informacyjne firmy Teijin, <http://www.teijinaramid.com/>
4. http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1992#_Key_Properties
5. W. Jabłoński, J. Wnuk "Włókna aramidowe bazą produktów innowacyjnych" Bielsko-Biała 2000
6. All about fibers, Peter J. Joyce, <http://www.thirdwave.de/3w/tech/armor/carbonfibre.pdf>
7. Lane R.A., „High performance fibers for personnel and vehicle armor systems”, *AMPTIAC* 9(2) 2005
8. <http://www.zimmer.com/>
9. LCF – June 2007, Performance Properties of the Most Frequently Utilized Fibers and Yarns, Bally Ribbon Mills 23 N 7th Street, Bally, PA 19512
10. Dyneema®, Broszura informacyjna firmy DSM
11. <http://www51.honeywell.com/sm/afc/products-details/fiber.html>
12. http://www.toyobo.co.jp/e/seihin/kc/pbo/menu/fra_menu_en.htm
13. Frequently asked questions about Zylon and body armour. Written and distributed by Toyobo Co. Ltd.; http://www.toyobo.co.jp/e/seihin/kc/pbo/pdf/ZYLON_Q_As.pdf
14. http://www.agy.com/technical_info/index.htm
15. Materiały informacyjne Core Composites, <http://www.corecomposites.com/>

16. HiPer-tex™ fibre for light weight, cost effective blast and ballistic protection solutions, www.3B-fibreglass.com
17. <http://www.lbie.com/n3111.htm>
18. <http://www.agy.com>
19. S. Bourbigot, X. Flambard, M. Ferreira, E. Devaux, F. Poutch "Characterisation and reaction to fire of "MS" rigid rod polymer fibres", *Journal of Materials Science* 38 (2003) 2187 – 2194,
20. MS in Overdrive, by James A. Bacon
21. <http://www2.dupont.com/>
22. MS Fiber, Magellan Systems International, <http://defense-update.com/products/m/m-5-fiber.htm>
23. Philip M. Cunniff, Margaret A. Auerbach "High performance "MS" fiber for ballistics/structural composites"; <http://web.mit.edu/course/3/3.91/www/slides/cunniff.pdf>
24. Materiały informacyjne firmy DSM
25. <http://www.bella.waw.pl/index.php?page=32>
26. Prospekt firmy Toyobo Co., Ltd, „PBO Fiber Zylon®” Zylon Departament, Japonia 1998
27. Her Majesty the Queen in Right of Canada, as represented by the Minister of National Defence, 2009 *The multifunctional materials needs of the future dismounted soldier*, Royale S. Underhill, PhD
28. Technical Information (Revised 2005.6), PBO fiber Zylon, Toyobo Co., Ltd.
29. Materiały informacyjne firmy Agy "S-2 Glass® Armor Systems, Personnel Protection, Vehicle Protection, Structural Protection", Printed in USA, March 2004, Pub. No. LIT-2004-011 (03/04)
30. <http://www.thirdwave.de/3w/tech/armor/carbon-fibre.pdf>
31. <http://www51.honeywell.com/honeywell/>
32. Materiały informacyjne firmy Honeywell, Honeywell International Inc 2007
33. <http://www.lbie.com/n3111.htm>
34. <http://www.moratex.eu/?dzial=wdrozenia&kat=1>
35. <http://www.lubawa.com.pl/www/?item=1047&sub=277&main=114&lang=1>
36. Lightweight Composite hard armour non apparel systems with T-963 3300 dtex Du Pont Kevlar 29 fibre. Prospekt firmy Du Pont.1993.
37. <http://www.safeguardclothing.com/38-ceramic-sapi-plate-ballistic-plates.html>
38. http://www.pointblanksolutionsinc.com/pointblankarmor_com/MILprod_helmets.html
39. <http://www.gotye.cn/encp3a.asp>
40. <http://www.engardebodarmor.com/hardarmor.htm>
41. <http://www.rdconsulting.pl/node/864>
42. <http://www.rdconsulting.pl/node/868>
43. Materiały informacyjne firmy TenCate Advanced Armor USA
44. Materiały informacyjne firmy Seal