

Właściwości i zastosowania włókien węglowych i szklanych

■ PAULINA MAYER, JACEK W. KACZMAR

W ostatnich latach kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami stały się samodzielną grupą tworzyw konstrukcyjnych stosowanych szczególnie w budowie środków transportu naziemnego i powietrznego. Szczególnie ważna jest ich wytrzymałość mechaniczna, co w połączeniu z relatywnie małą gęstością pozwala osiągać bardzo wysokie wytrzymałości względne wyrażone w [km], rozumiane jako stosunek wytrzymałości mechanicznej ($MN \cdot m^{-2}$) i ciężaru właściwego ($kN \cdot m^{-3}$). Ponadto relatywnie dobra udarność, wytrzymałość zmęczeniowa i duża odporność na korozję powodują, że materiały te są coraz szerzej stosowane. Obecnie najczęściej stosowane do wzmocniania polimerów są włókna węglowe i szklane.

Właściwości włókien węglowych

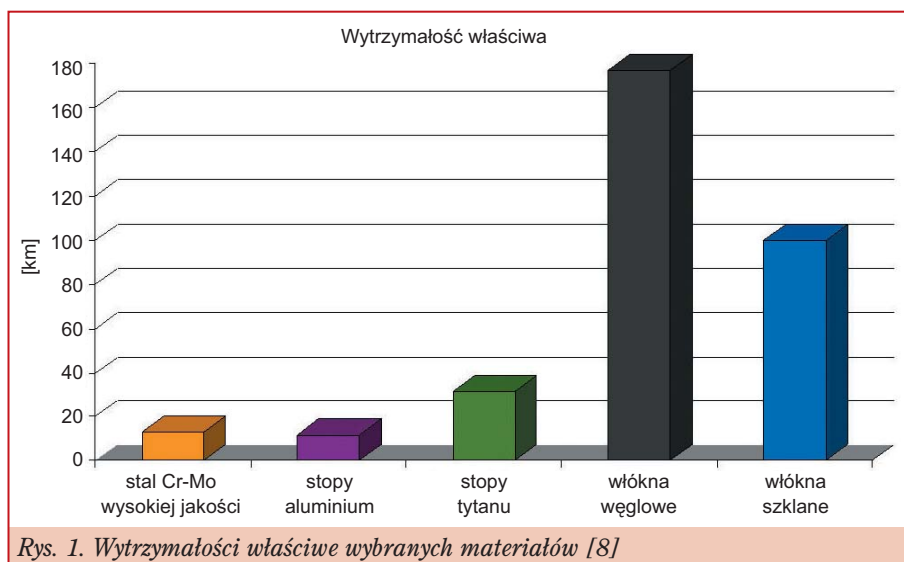
Włókna węglowe produkowane są w wyniku pirolizy głównie poliakrylonitrylu i na ich właściwości wpływ mają przede wszystkim zastosowane parametry wytwarzania [1, 2]. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe własności włókien węglowych.

Tabela 2. Dopuszczalne temperatury pracy włókien [5]

Zakres temperatur	Rodzaj włókna
niskie temperatury (do 100°C)	wszystkie dostępne włókna: szklane, węglowe, boru, organiczne, metalowe, ceramiczne, naturalne
podwyższone temperatury (100–400°C)	szklane, węglowe, boru, niektóre organiczne, metalowe, ceramiczne
średnie temperatury (400–700°C)	węglowe, metalowe, ceramiczne
wysokie temperatury (powyżej 700°C)	węglowe, ceramiczne

Włókna węglowe wytwarzane mogą być także z innych surowców, takich jak celuloza, asfalty, paki mezofazo-

we (pozostałość po destylacji smół węglowych) czy żywice fenolowe [4, 5].



Rys. 1. Wytrzymałości właściwe wybranych materiałów [8]

Tabela 1. Rodzaje i własności stosowanych włókien węglowych [3]

Rodzaj włókien	Zawartość węgla, %	Moduł Younga, GPa	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	Struktura krystaliczna
węglowe	80–98	90	900	słabo rozwinięta, mało zorientowana struktura heksagonalna
grafitowe	ok. 99	420	2500	dobrze wykształcona i zorientowana struktura heksagonalna

Włókna węglowe charakteryzują się dobrą odpornością cieplną i chemiczną, a temperatura pracy jest jednym z najważniejszych kryteriów wyboru danego rodzaju włókien do wzmocnienia materiału kompozytowego. Na przykład właściwości włókien węglowych nie zmieniają się w atmosferze nieutleniającej do temperatury 2000°C, w odróżnieniu od włó-

kien szklanych czy aramidowych [6, 7]. W tabeli 2 przedstawione zostały orientacyjne dopuszczalne temperatury pracy włókien, przy założeniu, że włókna są chronione przez osnowę przed działaniem środowiska zewnętrznego [5].

Głównymi zaletami włókien węglowych stosowanych do wzmocnienia osnów polimerowych są mała gęstość, dobra przewodność cieplna i elektryczna, a w przypadku zastosowania na materiały cierne mały współczynnik tarcia, ponadto włókna te posiadają zdolność tłumienia drgań oraz niską absorpcję promieniowania rentgenowskiego. Po rozpatrzeniu wytrzymałości właściwych różnych materiałów okazuje się, że parametr ten dla włókien węglowych jest najlepszy, co graficznie przedstawiono na rys. 1.

Do wad włókien węglowych zaliczyć należy brak możliwości ich powtórzonego stosowania ze względu na ich kruchość oraz relatywnie wysoką cenę.

Zastosowania włókien węglowych

Włókna węglowe znane są od wielu lat i już w 1880 roku Thomas Edison wykorzystywał włókna węglowe wytworzone z włókien celulozowych jako żarniki żarówek elektrycznych [3, 9]. Włókna węglowe jako elementy wzmocniające materiałów kompozytowych na osnowach polimerowych w ostatnich latach znajdują coraz szersze zastosowanie. Polimery wzmocniane włóknami węglowymi zastępują tradycyjne materiały i obecnie stosowane są do wytwarzania masztów jachtów i łodzi, ram rowerowych czy grotów do strzał. Ponadto włókna te stosuje się do produkcji tkanin termoodpornych i niepalnych, jak również tkanin grzejnych zasilanych prądem elektrycznym.

Deski surfingowe zbudowane z żywicy epoksydowych wzmocnianych włóknami węglowymi charakteryzują się bardzo dobrym stosunkiem wagi do wyporności, dużą wytrzymałością i odpornością na uderzenia oraz sztywnością. Polimerowe materiały kompozytowe wzmocniane włóknami węglowymi stosowane są także do produkcji nart, kijów golfowych oraz rakiet tenisowych [4, 10]. Zastosowanie lekkich włókien węglowych w konstrukcji kasków ochronnych spowodowało obniżenie ich masy (1,25 kg) i sprawiło, że są przy tym bardzo wytrzymałe.

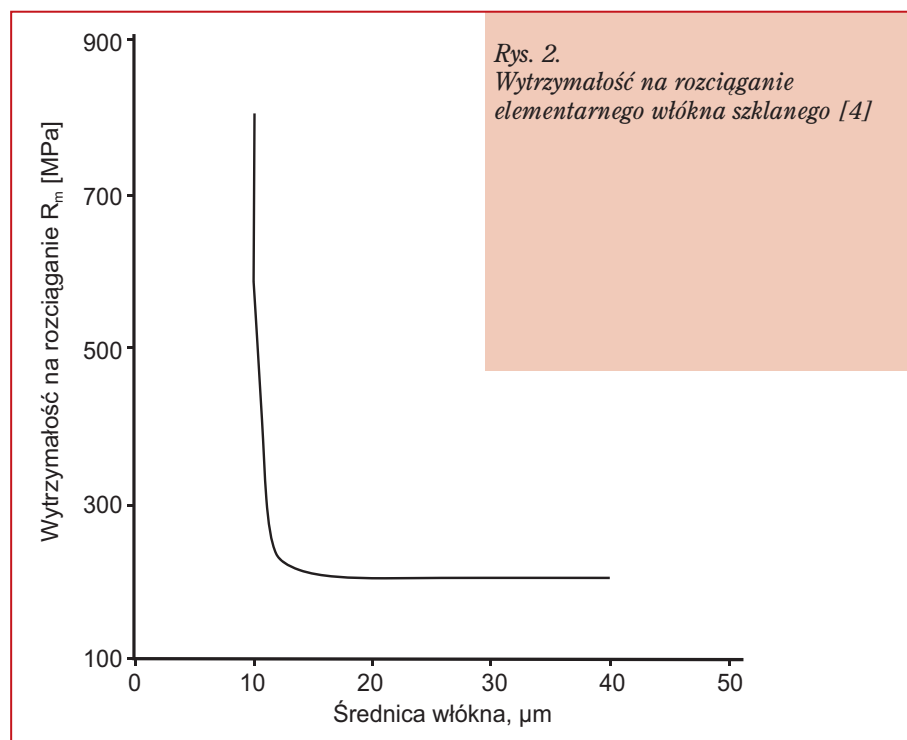
Polimerowe elementy kompozytowe na bazie włókien węglowych znalazły ponadto zastosowanie w budownictwie i wykorzystywane są jako wewnętrzne wkładki zbrojeniowe lub zewnętrzne zbrojenia [4, 1]. Dzięki ich elastyczności i doskonałym właściwościom mechanicznym zastosowanie materiałów kompozytowych na osnowach polimerowych pozwoliło na stosowanie nowych rozwiązań technicznych w konstrukcji budowli.

W branży medycznej włókna węglowe znajdują zastosowanie do wzmocnienia polimerowych szyn ortopedycznych, mających zastosowanie w ortezach. Umożliwia to znaczne zmniejszenie ich ciężaru, który jest kilkakrotnie mniejszy aniżeli ciężar ortez tradycyjnych, a ponadto posiadają zdolność do wysmienitego tłumienia drgań i jednocześnie charakteryzują się najlepszą odpornością na działanie sił uderowych i skręcających.

Kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami węglowymi zostały wy-

korzystane w budownictwie jako liny nośne mostów wiszących i już w latach osiemdziesiątych XX w. powstał pomysł wykorzystania materiałów kompozytowych w budowie mostu nad Cieśniną Gibraltarską, gdyż zastosowanie konstrukcji stalowej nie pozwoliłoby uzyskać założonej nośności mostu [1].

Materiały kompozytowe na osnowach polimerowych wzmocniane włóknami węglowymi stały się niezastąpione w konstrukcji nadwozi bolidów Formuły 1 i wykorzystuje się je obecnie w konstrukcji panelu głównego, skrzydeł i większości korpusu. Wytwarza się z nich elementy pracujące pod dużymi obciążeniami w konstrukcjach lotniczych i kosmicznych [6]. Z kompozytów zawierających włókna węglowe produkuje się więc łopaty wirników śmigłowców, zbiorniki ciśnieniowe, elementy podwozi oraz silników [11]. W kabinach statków kosmicznych stosuje się powłoki ablacyjne wykonane z żywicy epoksydowych umacnianych



Rys. 2.
Wytrzymałość na rozciąganie elementarnego włókna szklanego [4]

Tabela 3. Właściwości fizyczne i mechaniczne różnych typów włókien szklanych [4]

Rodzaj włókna szklanego	Średnica [μm]	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie R _m [MPa]	Moduł sprężystości E [GPa]
Typ E	5–9	2,54	1350–3500	60–70
Typ M	8–10	2,89	b.d.	124
Typ R	10	2,50	4750	83
Typ S	16	2,49	4900	87

włóknem węglowym. Dysze silników raketowych konstruowane są z żaroodpornych stopów metali zawierających włókna węglowe [12].

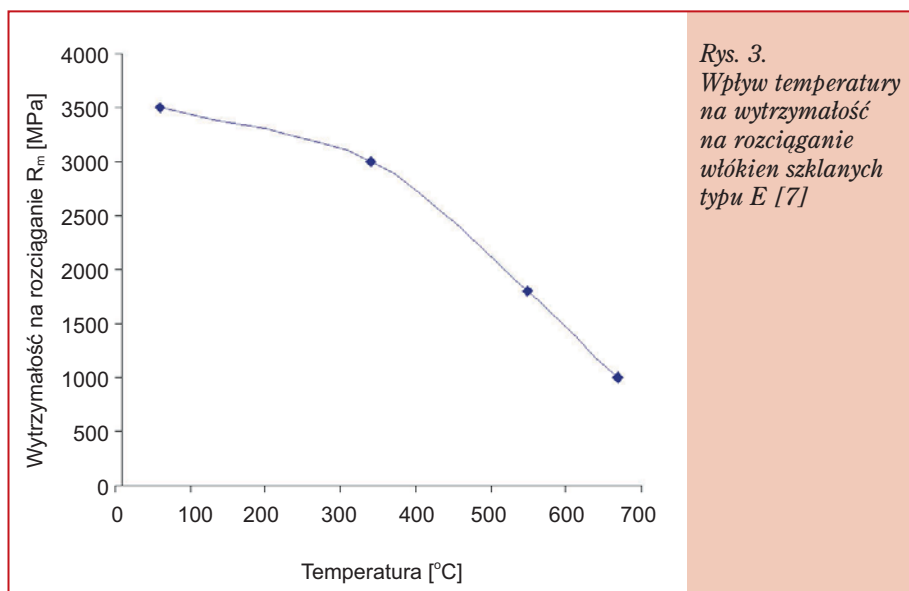
Właściwości włókien szklanych

Obecnie około 60% produkowanych włókien szklanych stosuje się do wytwarzania kompozytów na osnowach polimerowych, chociaż charakteryzują się one nieco gorszymi właściwościami fizycznymi i mechanicznymi od włókien węglowych [13]. Włókna szklane charakteryzują się małym wydłużeniem i wysokimi wartościami modułu sprężystości. Należy zwrócić uwagę na dobre właściwości dielektryczne, a mianowicie włókna te posiadają niskie wartości przenikalności elektrycznej względnej i współczynnika strat dielektrycznych.

Cenną zaletą włókien szklanych jest bardzo dobra zwilżalność przez polimery, a co za tym idzie, możliwość powstawania mocnego połączenia na granicach międzyfazowych polimer/szkło. Własności mechaniczne kompozytów wzmacnianych włóknami polepszają się wraz ze zwiększaniem długości włókien wzmacniających, natomiast wytrzymałość pojedynczego włókna szklanego zależy od jego średnicy (rys. 2). Jeżeli średnica włókna jest większa, to występuje w nim większe prawdopodobieństwo wystąpienia wad materiałowych i defektów oraz tzw. mikrokarbów i mikropeknięć [4].

Najczęściej do wzmacniania kompozytów na osnowie polimerowej stosuje się włókna szklane typu E, wytwarzane ze szkła glinowo-borowo-krzemowego, ponieważ charakteryzują się one lepszymi właściwościami elektrycznymi i wytrzymałością mechaniczną od włókien typu A. Także umiarkowany koszt produkcji wpływa na powszechność ich zastosowań [5]. W tabeli 3 przedstawione są podstawowe własności fizyczne i mechaniczne poszczególnych typów włókien szklanych.

Ze szkła typu M (wysokomodułowe) otrzymuje się włókna przeznaczone do wzmacniania elementów polimerowych o bardzo dużej wytrzymałości mechanicznej. Ponadto cechuje je podwyższona odporność termiczna oraz duży moduł sprężystości. Włókna szklane ze szkła typu M zawierają w swoim składzie tlenki berylu i cyrko-

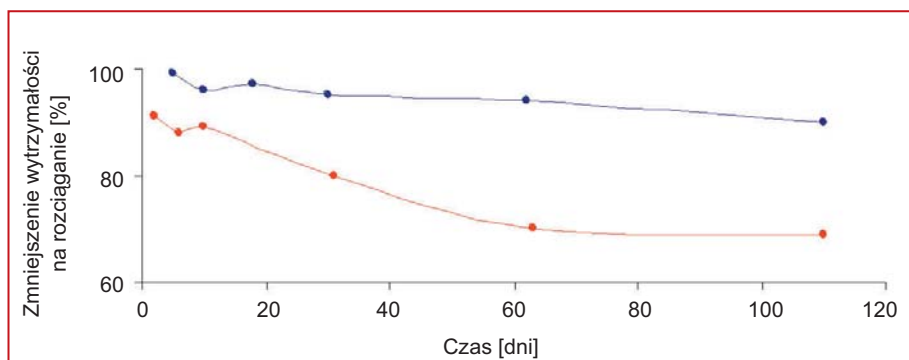


Rys. 3. Wpływ temperatury na wytrzymałość na rozciąganie włókien szklanych typu E [7]

nu, które wpływają na polepszenie ich właściwości [11].

Niestety włókna szklane charakteryzują się niższą temperaturą mięknie-

czasu składowania włókien szklanych typu E (wilgotność względna 100%) na spadek ich wytrzymałości na rozciąganie.



Rys. 4. Spadek wytrzymałości na rozciąganie włókien szklanych E w czasie składowania (niebieski – w atmosferze suchej; czerwony – przy wilgotności względnej 100%) [11]

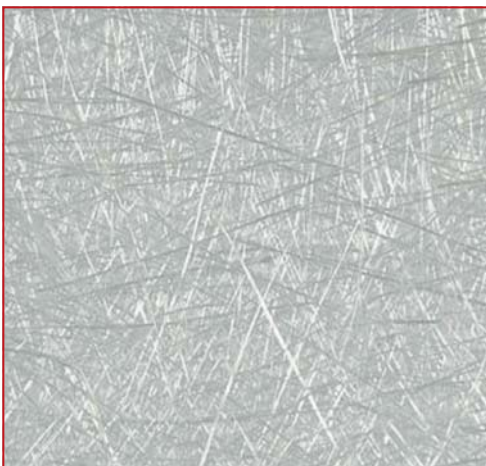
nia od włókien węglowych. Na przykład włókna typu E mają temperaturę mięknięcia 740°C. Na rys. 3 przedstawiono zależność wytrzymałości na rozciąganie włókien szklanych typu E od temperatury.

Kolejną niekorzystną cechą tych włókien jest ich wrażliwość na działanie wody, ponieważ wypłukuje ona sole metali alkalicznych, tworząc szczeliny w warstwach wierzchnich [12]. Aby temu zapobiec, włókna szklane pokrywane są warstwami zabezpieczającymi, które zapewniają ochronę przed negatywnym działaniem wilgoci ze środowiska. Związkami chemicznymi stosowanymi do tzw. preparacji są różnego rodzaju ksyłany oraz chlorometakrylan chromu. Na rys. 4 przedstawiono wpływ

Zastosowania włókien szklanych

Już w starożytności znano włókna pochodzące ze szkła, natomiast ich produkcja na skalę przemysłową rozpoczęła się w 1912 roku. Początkowo włókna szklane były używane jako izolacja cieplna, następnie zaczęto wytwarzać z nich tkaniny dekoracyjne i filtracyjne [11]. Dopiero pod koniec drugiej wojny światowej włókna szklane zastosowano do wzmacniania polimerów syntetycznych.

Polimerowe kompozyty wzmacniane włóknami szklanymi znalazły szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, głównie ze względu na konkurencyjną cenę w stosunku do lekkich stopów metali oraz relatywnie dobre właściwości mecha-



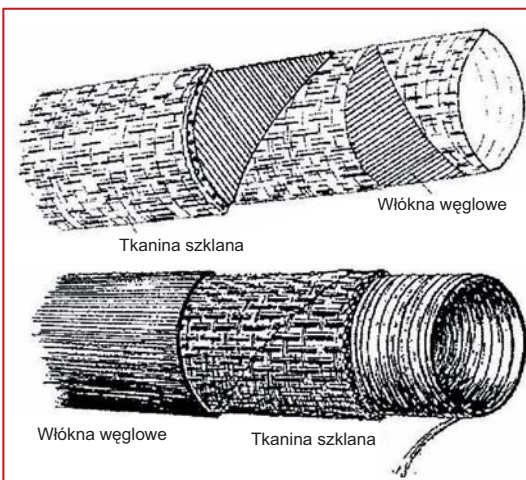
Rys. 5.
Włókna szklane cięte o średnicy
13–15 μm [19]

niczne [10, 14]. Włókna szklane występować mogą jako maty i tkaniny szklane, jedwab szklany, a także *roving*, tj. pasma elementarnych włókien, połączone ze sobą bez skrętu [5]. Na rys. 5 pokazano wygląd ciętych włókien szklanych stosowanych do wzmacniania materiałów polimerowych.

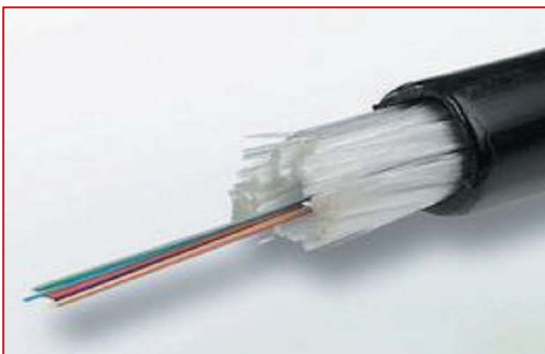
Odporność włókien szklanych na działanie ognia i czynników chemicznych sprawia, że z polimerów wzmacnianych takimi włóknami wykonywane są pojemniki magazynowe, wanny galwaniczne, różnego rodzaju rury, pompy i filtry czy zbiorniki na paliwo [12]. Jeżeli mowa o transporcie samochodowym, to należy podkreślić, że z żywic poliestrowych lub epoksydowych z włóknem szklanym wytwarzane są takie elementy, jak nadwozia ciężarówek, autobusów oraz samochodów osobowych, zderzaki, drążki skrętne czy kontenery chłodniowe. Również przyczepy kempingowe oraz cysterny samochodowe i kolejowe do przewozu cieczy wykonywane są coraz częściej z tego materiału.

Materiały kompozytowe wzmacniane włóknami szklanymi znalazły również zastosowanie w sporcie i rekreacji i na szczególną uwagę zasługują tyczki sportowe, których zadaniem jest zakumulowanie energii kinetycznej sportowca, a następnie jej wyzwolenie w odpowiednim momencie. Na rysunku 6 przedstawiono struktury dwóch rodzajów tyczek, charakteryzujących się różnym rozkładem i rodzajami włókien wzmacniających [15].

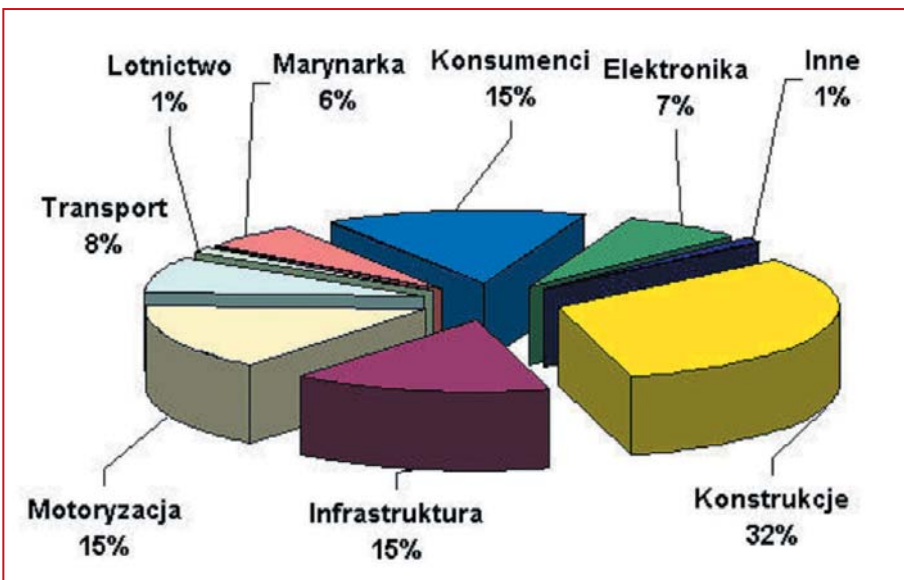
Kolejnymi produktami polimerowymi stosowanymi w sporcie, do wzmacniania których stosuje się włókna szkla-



Rys. 6.
Rozkład włókien węglowych
i szklanych w różnych typach
tyczek sportowych [15]



Rys. 7.
Struktura światłowodu [20]



Rys. 8. Europejski rynek kompozytów tworzywo polimerowe – włókna szklane [21].

ne są deski windsurfingowe, narty oraz rakiety tenisowe [12, 15].

W telekomunikacji, technice przemysłowej i komputerowej, a także telewizji cyfrowej coraz częściej transmisja danych odbywa się za pomocą światłowodów i na rys. 7 przedstawiono strukturę światłowodu, w skład którego wchodzi cylindryczne włókna szklane, które są otoczone powłoką izolacyjną.

Kompozyty typu polimery – włókna szklane są coraz częściej stosowane w różnych rodzajach przemysłu i ich wykorzystanie obrazuje rys. 8.

Porównanie własności fizycznych i wytrzymałości mechanicznej włókien węglowych i szklanych

Porównanie własności fizycznych i mechanicznych włókien węglowych i szklanych przedstawiono w tabeli 4. Wartość modułu Younga włókien węglowych jest znacznie wyższa ani-

Literatura

[1] J.F. NOISTERING: *Carbon fibre composites as stay cables for bridges. Applied composites materials*, 7, 2000, 139-150.
 [2] K.E. PEREPKIN: *Polymeric fibre composite, basic types, principles of manufacture and properties. Part 2. Fabrication and properties of polymer composite materials. Fibre Chemistry*, vol. 37, no. 5, 2005, 381-400.
 [3] W. PRZYGOCKI, A. WŁOCHOWICZ: *Fulereń i nanorurki*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
 [4] D. ŻUCHOWSKA: *Polimery konstrukcyjne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
 [5] A. BOCZKOWSKA, J. KAPUŚCIŃSKI, Z. LINDEMANN, D. WITEMBERG-PERZYK, S. WOJCIECHOWSKI: *Kompozyty*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
 [6] L.P. KOBETS, I.S. DEEV: *Carbon fibres: structure and mechanical*

tych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.

[13] Yu.A. KADYKOVA, S.E. ARTMENKO, O.V. VASIL'EVA, A.N. LEONT'EV: *Physico-mechanical reaction in polymer composite materials made from carbon, glass, and basalt fibres. Fibre Chemistry*, Vol. 35, No. 6, 2003, 455-457.
 [14] G. JANNERFELDT, R. TORNOVIST, N. RAMBERT, L. BOUGH, J.E. MANSON: *Matrix Modification for Improved Reinforcement Effectiveness in Polypropylene/Glass Fibre Composites. Applied Composite Materials*, 8, 2001, 327-341.
 [15] H. LEDA: *Kompozyty polimerowe z włóknami ciągłymi*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
 [16] J. JANG, C. LEE: *Fabrication and mechanical properties of glass fibre-carbon fibre polypropylene functionally gradient materials. Journal of Materials Science*, 33, 1998, 5445-5450.

Tabela 4. Właściwości fizyczne i mechaniczne włókien szklanych i węglowych [13, 17].

Włókna	Gęstość [g/cm ³]	Średnica, [μm]	Porowatość [cm ³ /g]	Wytrzymałość na rozciąganie R _m [MPa]	Moduł Younga, [GPa]	Temperatura topnienia, [°C]	Cena [zł/kg]
Węglowe	1,6-2,0	8	0,05-0,1	2800-5000	230	3600	100
Szklane	2,5-2,6	10-15	0,005-0,01	1500-2700	80-90	700-900	10

żeli włókien szklanych, co wpływa na wyższe wartości tego parametru materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknami węglowymi. Ponadto główną zaletą włókien węglowych jest ich niższa gęstość oraz mniejszy współczynnik rozszerzalności cieplnej, co ma znaczenie dla trwałości połączeń adhezyjnych na granicach międzyfazowych [16]. Jeżeli chodzi o cenę włókien to ma ona istotny wpływ na ich powszechne stosowanie. Kilogram włókien szklanych kosztuje obecnie 10 zł, natomiast włókna węglowe są dziesięciokrotnie droższe [7, 10]. Ważną rolę w wyborze włókien, wzmocniających spełnia ich gęstość, dlatego do wyrobów, których zaletą będzie mały ciężar stosować należy włókna węglowe. Natomiast włókna szklane dominują w materiałach kompozytowych, od których wymaga się mniejszych modułów sprężystości przy relatywnie niskiej cenie [8, 18].

properties. *Composites Science and Technology*, 57, 1997, 1571-1580.

[7] H. LEDA: *Szklane czy węglowe włókna w kompozytach polimerowych. Kompozyty*, 3, 2003, 7.
 [8] K. PRZYBYŁOWICZ: *Metaloznawstwo*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
 [9] M. PETER, A. SHERWOOD: *Surface analysis of carbon and carbon fibres for composites. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 81, 1996, 319-342.
 [10] P. WAMBUA, J. IVENS, I. VERPOEST: *Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastic. Composite Science and Technology*, 63, 2003, 1259-1264.
 [11] W. KRÓLIKOWSKI: *Tworzywa wzmocnione i włókna wzmocniające*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988.
 [12] H. DĄBROWSKI: *Wytrzymałość polimerowych kompozytów włóknis-*

te materials made from carbon, basalt and glass fibres. Fibre Chemistry, vol. 35, no.3, 2003, 226-229.

[18] R. SOB CZAK, Z. NITKIEWICZ, J. KOSZKUL: *Właściwości dynamiczne i struktura kompozytów polipropylenu z włóknem szklanym. Kompozyty*, 4, 2004, 12, 369-373.
 [19] <http://www.krosglass.pl>
 [20] www.swiatlowody.net
 [21] http://tworzywa.com.pl/statystyki_zestawienia/statystyki_zestawienia.asp?ID=4638.

■ dr hab. inż. J.W. Kaczmar
 – prof. PWR, Kierownik Laboratorium Tworzyw Sztucznych Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej

■ mgr P. Mayer
 – doktorantka w Laboratorium Tworzyw Sztucznych