https://doi.org/10.62753/ctp.2003.11.7.7

Henryk Leda[1]
Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Materiałowej, pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań

SZKLANE CZY WĘGLOWE WŁÓKNA W KOMPOZYTACH POLIMEROWYCH

Artykuł został podzielony na dwie części - zaprezentowano ogólny przegląd wiadomości oraz wyniki badań własnych dotyczących kompozytów umocnionych włóknami węglowymi lub szklanymi. W pierwszej części wprowadzającej omówiono popularne opinie spotykane w mediach, w których przedstawia się zalety włókien węglowych do materiałów kosmicznych i prezentowane z tego powodu znacznie częściej aniżeli włókna szklane. Następnie omówiono fizykochemiczne podstawy uzyskiwania przez włókna węglowe tak dobrych właściwości, dzięki czemu znajdują również zastosowania w obszarach innych aniżeli kosmiczne czy militarne. W dalszej części rozdziału wprowadzającego przedstawiono bardziej znane argumenty przemawiające za stosowaniem włókien szklanych do umacniania kompozytów, jak np. niski koszt i brak przewodzenia prądu elektrycznego. W części końcowej rozdziału wprowadzającego zamieszczono zebrane informacje o włóknach węglowych i szklanych obecnych w kilkuset artykułach w wiodących czasopismach o tematyce kompozytowej oraz w polskich książkach traktujących o kompozytach. W części drugiej podano wyniki badań własnych nad kompozytami polimerowymi umocnionymi włóknami węglowymi lub szklanymi. W pierwszym podrozdziale przedstawiono wyniki pomiarów ściskania osiowego kompozytowych wyrobów rurkowych, np. tyczek sportowych, wędek i masztów surfingowych ze szczególnym uwzględnieniem roli włókien węglowych i szklanych w kształtowaniu się wyników pomiarów. Podano również wyniki ściskania osiowego grubościennych próbek kompozytowych po długim kontakcie z gorącą parą wodną. Trzecia część rozdziału 2 przedstawia wyniki różnych prób zginania oraz wskazania odnośnie do wyboru właściwych par żywica/włókna dla uzyskania najwyższych wartości wytrzymałości na zginanie. W kolejnej części omówiono wyniki prób pomiaru wytrzymałości na ścinanie, w których zaprezentowano wpływ włókien i osnowy na efekt objętości w próbie ścinania. W końcowej części omówiono wyniki pomiarów pochłaniania energii podczas zginania udarowego oraz uderzania z niską i wysoką energią w płyty kompozytowe. W próbach tych widać wyraźną przewagę kompozytów z włóknami szklanymi. Artykuł odpowiada w miarę wyczerpująco na pytanie postawione w tytule.

Słowa kluczowe: włókna węglowe, włókna szklane, kompozyty, wybrane właściwości kompozytów

GLASS OR CARBON FIBRES IN POLYMER MATRIX COMPOSITES

The paper is divided into two parts: general review and results of author's experiments concerning composites reinforced with carbon or glass fibres. The review deals with popular opinions presented in the media, where adventages of carbon fibres are widely discussed and rated as cosmic materials; therefore glass fibres being less often mentioned. This is followed by a presentation of physical and chemical principles of excellent properties of carbon fibres, leading to their applications also in the areas distinct from space and military industries. In the next part od this chapter the widely known arguments in favour of glass fibers, such as low cost and electrical non-conductivity are discussed. In the last part of the introduction data concerning carbon and glass fibres taken from papers published in world leading magazines in this field were summarized. Polish books dealing with composite materials are also reviewed. In the second part of this paper the results of experiments in the field of composites reinforced with carbon or glass fibres are presented. In the first subchapter the results of axial compression tests of tube products e.g. vaulting poles, fishing poles or boat masts are shown. Special emphasis is put on the influence of carbon or glass fibres on the above-mentioned parameters. The second subchapter shows the results of the influence of hot water vapour on the strength of thick-walled composite samples reinforced with carbon or glass fibres in tests of axial compression. The results of different bending tests are described in an attempt to select the combination of fibres and matrix with the best strength parameters in these tests. The fourth subchapter deals with the results of short beam tests, evaluating the influence of fibres and matrix on volume effect in these conditions. In the last part of this work energy absorption tests e.g. impact bending, low and high energy striking against composite plates are discussed and superiority of glass fibres is highlightened. The paper seems to answer the question in its title.

Key words: carbon fibres, glass fibres, composite materials, selected composite properties

WSTĘP

Popularne argumenty za stosowaniem włókien węglowych

W mediach często spotyka się określenia charakteryzujące wyrób wykonany z włókien „karbonowych" jako najnowocześniejszy i najlepszy, co według autorów tych doniesień jest gwarancją najwyższej jakości. Podobnie w superlatywach określa się wyroby wykonane z włókien „kevlarowych". W popularnych doniesieniach mniej informacji dotyczy wyrobów z udziałem włókien szklanych. Relacje te wynikają częściowo z bardziej egzotycznego brzmienia nazwy włókna karbonowe - węglowe, lecz również częściowo z przenikających z prasy specjalistycznej informacji o unikalnych właściwościach włókien węglowych lub grafitowych.

[1] dr hab. inż.

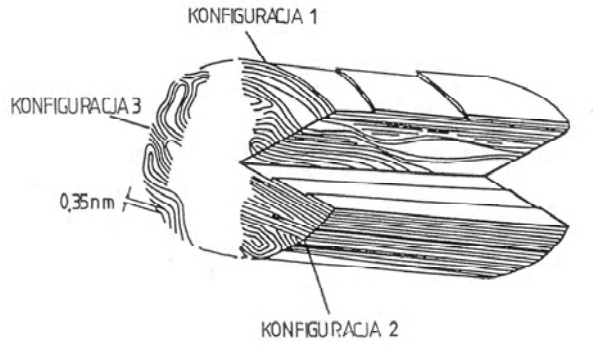
Pewne uzasadnienie preferencji dla włókien węglowych wynika z analizy publikacji w wiodących czasopismach naukowych traktujących o kompozytach. Przegląd roczników z lat 1990-2000 wykazał, że liczba artykułów o tematyce związanej z włóknami węglowymi do artykułów związanych z włóknami szklanymi ma się jak 15:11 i w rocznikach z kolejnych lat proporcje te rosną. Podobna analiza przeprowadzona w polskich książkach o tematyce kompozytowej wykazała, że proporcje informacji na temat włókien węglowych do informacji na temat włókien szklanych są następujące: W. Królikowski - wyraźna przewaga włókien szklanych, I. Hyla - przewaga włókien szklanych, J. Śleziona - 4:3, A. Buczkowska, J. Kapuścinski, K. Puciłowski, S. Wojciechowski - 2:3, H. Leda - 2:1. Sumując powyższe wyniki można stwierdzić, że w latach 1990-2000 przybywa informacji o włóknach węglowych (i aramidowych) kosztem informacji o włóknach szklanych.

Zważywszy na elementy nowoczesności oraz większą nośność tematyki związanej z włóknami węglowymi, celowe jest podjęcie próby zsumowania podstawowych, obiektywnych informacji niezbędnych w prawidłowej działalności projektowej i eksploatacyjnej oraz w dużej mierze do prawidłowej i obiektywnej edukacji młodzieży studiującej nauki o materiałach.

Wybrane informacje ilustrujące atrakcyjne właściwości włókien węglowych

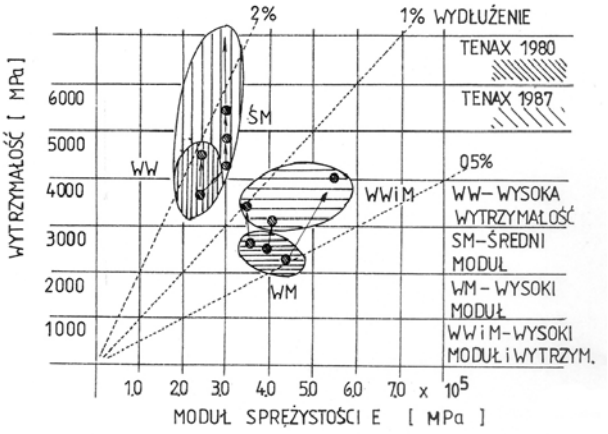
Atomy węgla z konfiguracją elektronów $1s^2 2s^2 2p^2$ tworzą cztery równorzędne wiązania. Zgodnie z regułą Hunda dwa elektrony 2p nie są sparowane i przy małych różnicach pomiędzy stanami 2s i 2p rozkład elektronów może być następujący: $1s^2\uparrow\downarrow$, $2s^1\uparrow$, $2p^3\uparrow\uparrow\uparrow$. Powstałe w ten sposób cztery niesparowane elektrony tworzą pomiędzy dwoma atomami węgla bardzo silne wiązania kowalencyjne 4 x 1,83eV = 7,4eV. Poza hipotetycznymi wiązaniami w związku CN są to najsilniejsze wiązania pomiędzy atomami. Nic też dziwnego, że włókna węglowe zajmują tak wysoką pozycję w technologii kompozytowej. Wszechstronne badania pozwoliły na stworzenie współczesnego obrazu powierzchni włókien węglowych. Poznanie morfologii powierzchni pozwoliło na racjonalne preparowanie powierzchni włókien przed ich inkludowaniem w różnych osnowach (rys. 1).

Technologia produkcji włókien węglowych ulega ciągłej poprawie i doprowadziła do uzyskania włókien o znakomitych właściwościach (rys. 2). W szczególności zwraca uwagę jednoczesne podwyższanie wytrzymałości i sztywności nowoczesnych włókien. Tak wysokie parametry spowodowały pozostanie na rynku tylko części producentów, co jednocześnie skutkuje utrzy- mywaniem się stałych wysokich cen tego produktu.



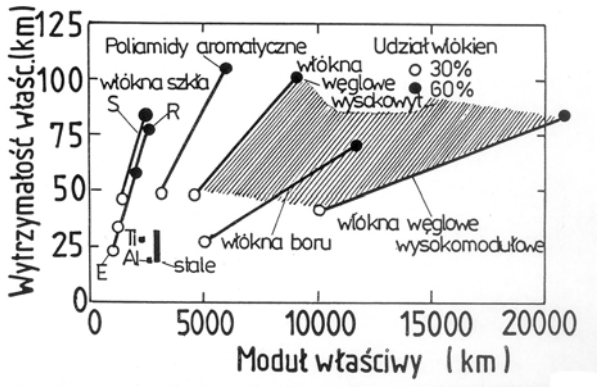
Rys. 1. Ułożenie warstw węgla na powierzchni włókna powstałego z karbonizacji polimeru PAN [1]

Fig. 1. Distribution of carbon layers on surface of carbon fibre prepared from PAN [1]



Rys. 2. Moduły sztywności i wytrzymałości współczesnych włókien węglowych i grafitowych [2]

Fig. 2. Modulus and tensile strength of contemporary carbon and graphite fibers [2]



Rys. 3. Wytrzymałość właściwa i moduł właściwy nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych [3]

Fig. 3. Specyfic strength and specyfic modulus of contemporary structural materials [3]

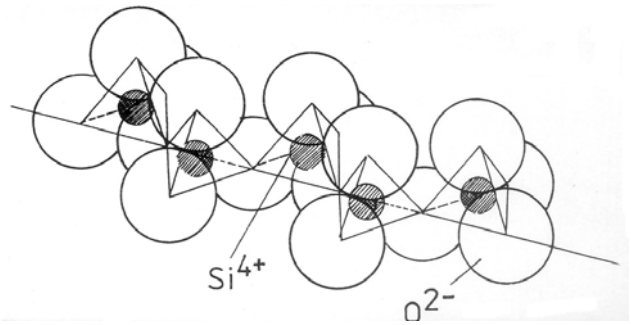
W atmosferach nieutleniających włókna węglowe nie tracą swych właściwości w temperaturach ponad 2000°C, co wyróżnia je niezwykle korzystnie z włókien szklanych i aramidowych. W wybranych kompozytach z włóknami węglowymi uzyskuje się właściwości nieosią-

galne również w innych materiałach konstrukcyjnych (rys. 3).

Jedną z najważniejszych cech wyróżniających kompozyty z włóknami węglowymi jest zachowanie 20% wytrzymałości resztkowej po trudnej próbie zmęczeniowej w wilgoci. W tej samej próbie kompozyty z włóknami szklanymi zachowują tylko 9% wytrzymałości [4]. Również inne próby zmęczeniowo-wilgotnościowe stawiają wyroby z włóknami węglowymi ponad podobne wyroby z włóknami szklanymi.

Techniczne i handlowe dane ilustrujące zalety włókien szklanych

Podstawowym składnikiem włókien szklanych jest krzemionka tworząca włókna. Pomiędzy atomami krzemu i tlenu dominują wiązania jonowe (rys. 4).



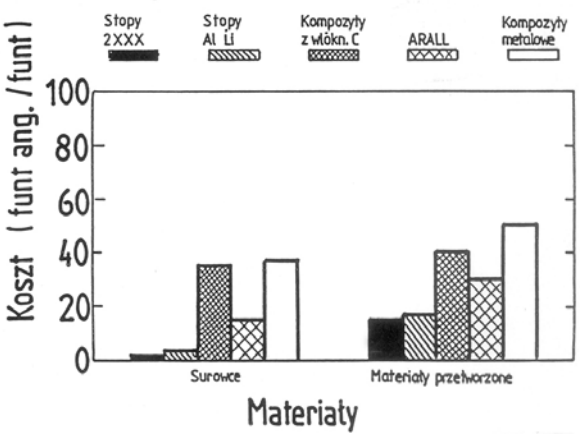
Rys. 4. Struktura krzemionki w postaci włóknistej

Fig. 4. Fibrous silica

Niestety w szkłach, z których produkuje się włókna, obecne są jeszcze inne pierwiastki, tworzące z tlenem związki z wydłużonymi odległościami międzyatomowymi, co osłabia szkła. Można przyjąć, że, znając aktualne właściwości włókien węglowych pierwszym kryterium wyboru włókien szklanych jest ich niska cena. Obecnie za kilogram dobrych włókien szklanych trzeba zapłacić 10 zł, podczas gdy za kilogram standardowych włókien węglowych musimy zapłacić ponad 100 zł. Dodatkowym utrudnieniem w nabyciu włókien węglowych jest minimum handlowe. Dystrybutorzy włókien Toray oferują minimalne ilości 25 kg. Jednak należy mieć na uwadze, że wysokie koszty włókien węglowych są częściowo rekompensowane przez niskie koszty wytwarzania gotowych produktów (rys. 5).

Według nowszych źródeł [6], w latach 1985-1986 światowa produkcja włókien szklanych wynosiła $1280x10^3$ ton/rok, włókien węglowych 3300 ton/rok, włókien organicznych 3600 ton/rok oraz włókien ceramicznych kilka ton.

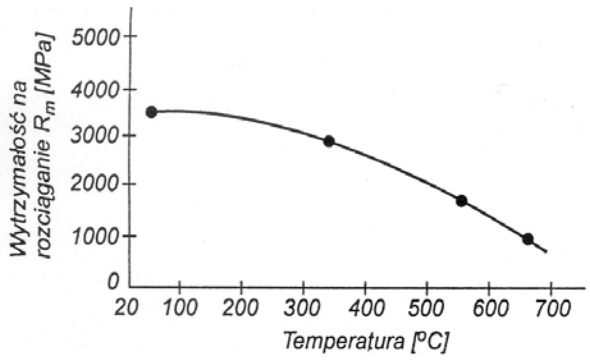
Kolejnym argumentem za stosowaniem włókien szklanych jest ich nieprzewodzenie prądu, niepylenie czarnym pyłem, łatwość formowania wyrobów łącznie z tkaniem użytecznych tkanin. Możliwość formowania różnych wyrobów wynika z większej wytrzymałości włókien szklanych przy tworzeniu pętli wynoszącej odpowiednio dla szkła, węgla i aramidu z równymi wytrzymałościami na rozciąganie 1128, 623 i 2284 MPa. Minimalny promień pętli $\rho_{min} = Ed/2R_m$ [6] zależy od modułu sztywności, który dla szkła jest niższy od modułu węgla.



Rys. 5. Koszty względne surowców i gotowych produktów dla wybranych materiałów [5]

Fig. 5. Relative costs of row materials and consumption ready products for selected materials [5]

Inne zalety włókien szklanych są omawiane dalej. Wytrzymałość włókien szklanych maleje wraz ze wzrostem ich średnicy, co należy uwzględniać przy projektowaniu wyrobów kompozytowych narażonych głównie na rozciąganie. Jednak już w wyrobach ściskanych wykorzystuje się większe moduły sztywności przypisane włóknom z większymi średnicami. Mniej ciekawym aspektem w ocenie włókien szklanych jest ich wrażliwość na wysokie temperatury (rys. 6).



Rys. 6. Wpływ temperatury na wytrzymałość na rozciąganie włókien szklanych typu E [6]

Fig. 6. Relationship between temperature and tensile strength of glass fiber E [6]

Popularne włókna szklane typu E mają temperaturę mięknięcia około 740°C. W praktyce różne włókna szklane typu E po 3-godzinnym wyżarzaniu w temperaturze 650°C stają się tak słabe i kruche jak motek waty.

WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH RÓŻNICUJĄCYCH WPŁYW WŁÓKIEN WĘGLOWYCH I SZKLANYCH NA WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTÓW

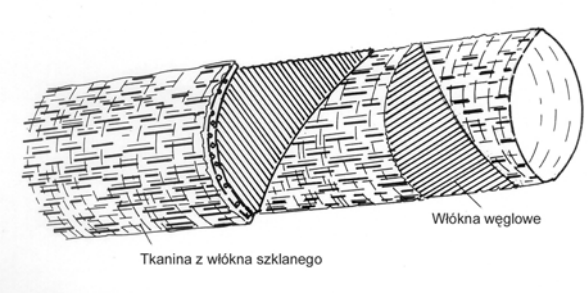
Wpływ środowiska wodnego

Połączenie dwóch lub kilku składników w wyrób kompozytowy powoduje, że jest on bardziej wrażliwy na działanie wody i wilgoci niż wyroby jednorodne. Włókna szklane reagują z wodą i nawet z włókien specjalnie projektowanych w celu zmniejszenia wrażliwości na wodę wypłukują się jony magnezu, tworząc szczeliny w warstwach wierzchnich. Stawia to włókna szklane w trudniejszej sytuacji przy porównywaniu z włóknami węglowymi. W pracy [7] pokazano stopień osłabienia grubościennych próbek kompozytowych w próbie ściskania osiowego po kilkudziesięciu dniach kontaktu z parą wodną o temperaturze 60^{o}C. Mierzono wytrzymałość na ściskanie próbek o przekroju 400 mm^2 z osnową z żywicy Bakelite wzmocnionej włóknami węglowymi Toray 300 oraz włóknami szklanymi typu E o średnicy 18 μm z usuniętą warstwą związków silanowych oraz z nałożoną powłoką ze związków aminowych. Wybór tego zestawu do prób w środowisku pary wodnej był podyktowany mniejszym stężeniem porów w próbkach. Wyjściowa wytrzymałość na ściskanie osiowe włókien szklanych wynosiła 420 MPa, natomiast próbek z włóknami węglowymi wykazała 400 MPa. Sztywniejsze włókna węglowe umocniły żywicę Bakelite do wartości porównywalnych z niskomodułowymi włóknami szklanymi. W innej serii prób z włóknami ze szkła E, lecz o średnicy 24 μm uzyskano wytrzymałość na ściskanie 550 MPa. W serii z włóknami o średnicy 18 μm po 10 dniach prób wytrzymałość próbek z włóknami szklanymi obniżyła się do poziomu 300 MPa, podczas gdy próbki z włóknami węglowymi zachowały wytrzymałość wyjściową do 40 dni prób. Wyniki potwierdzają zjawisko większej wrażliwości na działanie wody i wilgoci kompozytów z włóknami szklanymi. Przez 30 dni przebywania w środowisku wodnym próbki z włóknami szklanymi zwiększyły swój ciężar o 0,708%, natomiast próbki z włóknami węglowymi stały się cięższe o 0,483%. Stąd wyczynowy sprzęt sportowy pozostający w kontakcie z wodą produkuje się z kompozytów z włóknami węglowymi. Jednak ze względu na brak pełnej odporności na wodę również kompozyty z włóknami węglowymi zabezpiecza się dodatkowo. Dla przykładu maszt deski surfingowej jest obłożony na obydwu powierzchniach folią.

Wyniki ściskania osiowego rurek kompozytowych

W rywalizacji włókien szklanych i węglowych znajdujemy aplikacje, w których włókna szklane mają znacznie większe szanse na zastosowanie aniżeli włókna węglowe. Do takich zastosowań należą tyczki do skoków o tyczce. Aby spełniły swe zadania tyczki, muszą się silnie wygiąć i następnie wynieść sportowca na odpowiednią do jego możliwości i ciężaru wysokość. W tym przypadku większy ciężar wyrobu z włóknami szklanymi nie jest przeszkodą w ich zastosowaniu, gdyż jednorazowy wysiłek przy dobiegu do stanowiska jest adekwatny do możliwości wytrenowanego sportowca.

Tyczki produkuje się z włókien szklanych zainkludowanych w czarnej żywicy, co sugeruje, że wykonano je z włókien węglowych. W rzeczywistości obok włókien szklanych obecnych jest tylko część włókien węglowych, około 20% (rys. 7).

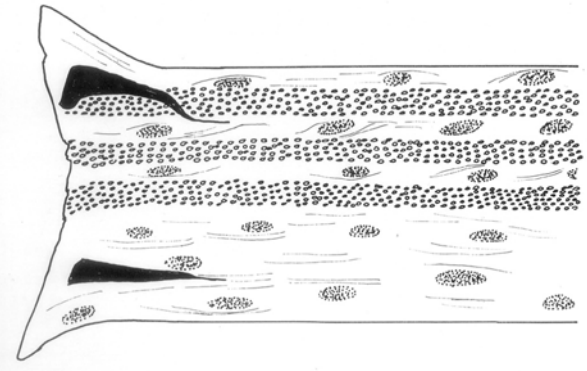


Rys. 7. Schemat rozłożenia włókien szklanych i węglowych w tyczce sportowej

Fig. 7. Schematic illustration of distribution of carbon and glass fibres in a vaulting pole

Przy projektowaniu tyczek wysiłek projektantów jest skierowany na uzyskanie efektu maksymalnego podnoszenia sportowca, co wymaga wzmocnienia i odpowiedniego usztywnienia rurki w kierunku osi głównej. Często odbywa się to kosztem osłabienia wytrzymałości przy ściskaniu osiowym, a takie obciążenie nadaje tyczce sportowiec w pierwszej fazie skoku. Podczas tej fazy skoku pękła tyczka rekordzisty świata S. Bubki z Ukrainy. Podczas ściskania osiowego tyczki szklano-węglowej z rysunku 7 uległa ona zniszczeniu przy naprężeniu 300 MPa. Powodem niszczenia przy relatywnie niskich naprężeniach jest rozwarstwienie przebiegające jak pokazano na rysunku 8.

Inne wymagania stawia się rurkom kompozytowym, z których wykonuje się maszty desek surfingowych.



Rys. 8. Schemat zniszczonego w próbie ściskania osiowego zakończenia tyczki

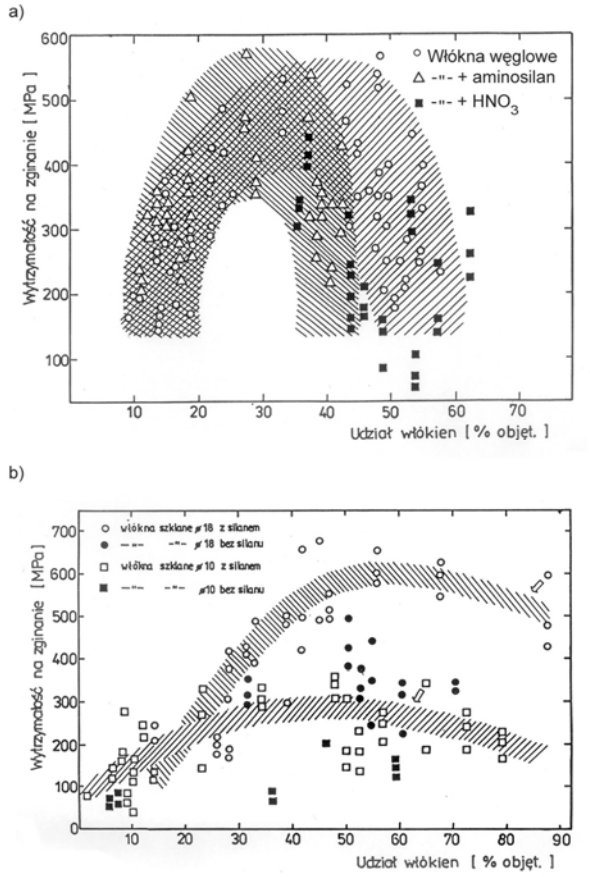
Fig. 8. Schematic illustration of crashed part of axially compressed vaulting pole

Wymagana jest maksymalna sztywność i minimalny ciężar. Wymaganiom tym mogą sprostać tylko rurki kompozytowe z włóknami węglowymi. W masztach wyczynowych desek surfingowych wypełnia się żywicę 70% udziałem włókien węglowych, co pozwala na uzyskanie w próbie ściskania osiowego wytrzymałości 560 MPa. W tanich rurkach do produkcji wędek udział włókien węglowych wynosi około 20%, co powoduje, że wytrzymałość na ściskanie osiowe wynosi tylko 200 MPa.

Wysoka cena włókien węglowych w połączeniu z aspektem handlowo-reklamowym przyczynia się do tego, że na rynku artykułów sportowych znajdują się wyroby podrzędnej jakości.

Zginanie trójpunktowe

Poniżej przedstawiono wyniki trójpunktowego zginania próbek umocnionych włóknami ciągłymi w kierunku wzdłuż próbki. Wyroby dla protetyki stomatologicznej z PMMK umacnia się dodatkowo wysoko wytrzymałymi włóknami.



Rys. 9. Wytrzymałość na zginanie próbek PMMK umocnionych włóknami: a) węglowymi, b) szklanymi

Fig. 9. Bending strength of PMMK samples reinforced with: a) carbon fibers, b) glass fibers

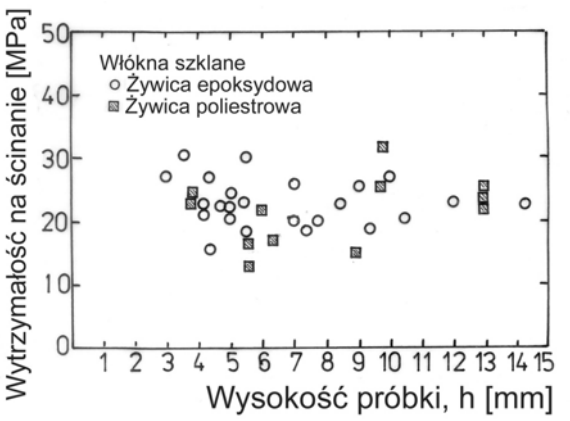
Najwyższe wartości wytrzymałości na zginanie uzyskano dla próbek z włóknami szklanymi, potem z włóknami węglowymi i najmniejsze wartości wytrzymałości maksymalnej otrzymano dla próbek z włóknami aramidowymi. Problem polega na tym, że w wyrobach protetycznych trudno wykorzystać możliwości, jakie uzyskuje się przy udziale 40÷50% włókien. W prak- tyce można wykorzystać tylko obecność 10÷15% włókien. W tej sytuacji, przy niskim udziale włókien, lepsze wyniki uzyskuje się dla włókien węglowych (rys. 9).

Jednak ze względów estetycznych nie stosuje się włókien węglowych i prowadzi badania nad zastosowaniem włókien aramidowych [8]. W kompozytach z żywicami poliestrowymi i epoksydowymi dla warunku próby $l/h = 32$ najwyższe wartości wytrzymałości na zginanie otrzymuje się dla próbek z włóknami węglowymi [9]. W zrealizowanych próbach zaznacza się prze- waga próbek kompozytowych z włóknami węglowymi.

Ścinanie

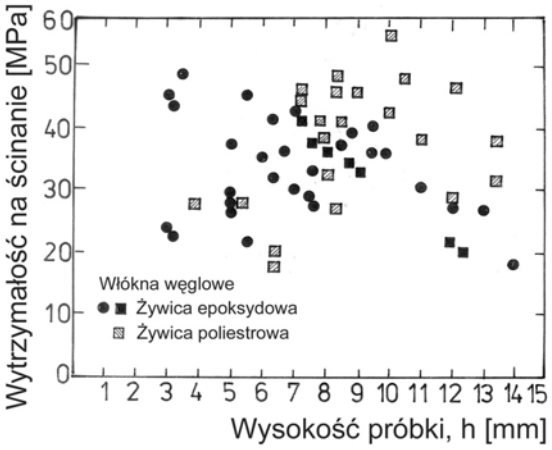
Pomiary odporności na ścinanie międzylaminarne przeprowadzono na krótkich belkach o zmiennych wymiarach, ale przy zachowaniu proporcji rozstawu podpór do wysokości próbki jak 5:1. Jednym z zadań próby było stwierdzenie, czy wyniki zależą od objętości tzw. size effect. Dla zestawu niskomodułowe żywice epoksydowa Der i poliestrowa Novol oraz niskomodułowe włókna szklane typu E nie stwierdzono wpływu objętości ścinanej próbki (rys. 10).

Wyniki dla próbek wzmocnionych włóknami węglowymi wykazują zróżnicowanie w zależności od rodzaju osnowy. Dla miękkiej żywicy epoksydowej Der zachowanie się kompozytów jest podobne jak zachowanie się próbek z włóknami szklanymi, tzn. nie stwierdza się zależności wartości naprężeń ścinania od objętości. W próbkach z włóknami węglowymi i sztywniejszą żywicą poliestrową wytrzymałość na ścinanie ma tendencję rosnącą wraz ze wzrostem objętości próbki (rys. 11).



Rys. 10. Wpływ objętości ścinanej próbki z żywicy epoksydowej i poliestrowej wzmocnionej włóknami szklanymi na wytrzymałość na ścinanie

Fig. 10. Influence of sample volume containing epoxy or polyester matrix and glass fibres on shear strength



Rys. 11. Wpływ objętości ścinanej próbki z żywicy epoksydowej i poliestrowej wzmocnionej wysokowytrzymałymi włóknami węglowymi na wytrzymałość na ścinanie

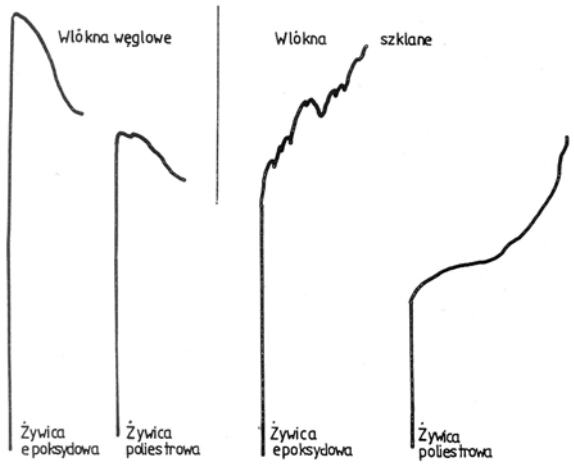
Fig. 11. Influence of sample volume containing epoxy or polyester matrix and high strength carbon fibres on shear strength

Sztywne włókna węglowe pozwalają sterować wartościami wytrzymałości na ścinanie poprzez dobór różnych żywic w zależności od objętości wyrobu kompozytowego. Wyniki z prób ścinania można uznać za bardziej korzystne dla włókien węglowych.

Pochłanianie energii

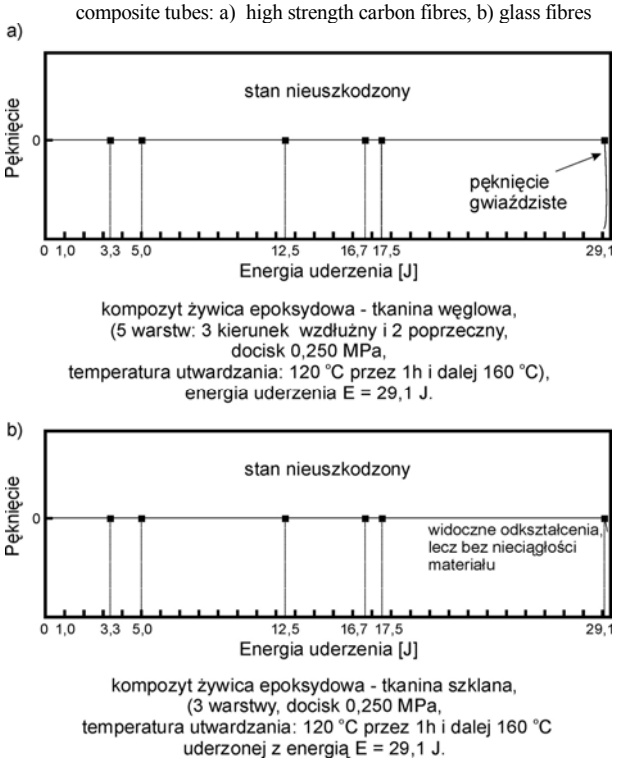
W literaturze przedmiotu można znaleźć liczne informacje o stosowaniu wyrobów kompozytowych z włóknami szklanymi do ochrony odpowiedzialnych kabli przed przypadkowym zniszczeniem. Dotyczy to zarówno cyklicznych obciążeń z niską energią, jak i obciążeń wysokoenergetycznych. Ilustracją korzystnego zachowania, tzn. gromadzenia energii, są wykresy sił podczas spłaszczania rurek o grubości 5 mm i średnicy zewnętrznej 30 mm przedstawione na rysunku 12.

a) b)



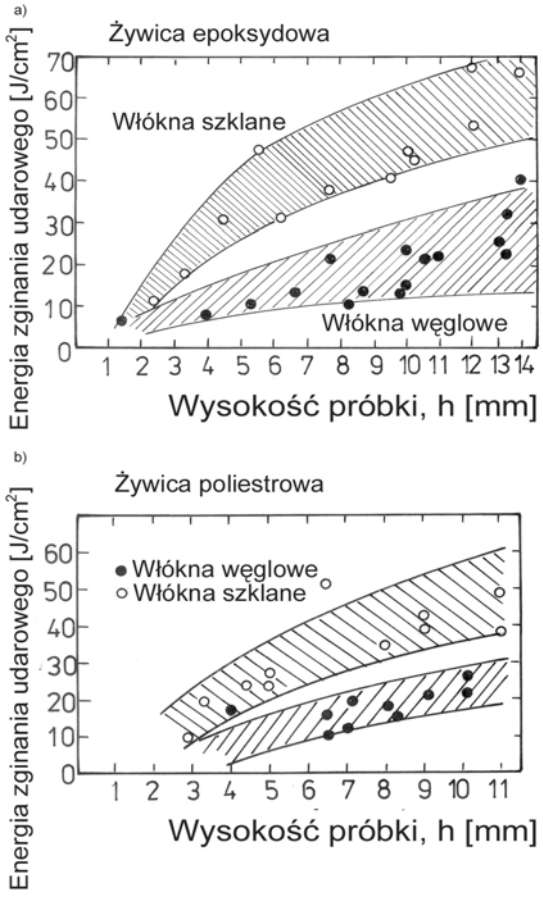
Rys. 12. Wykresy siła-przemieszczenie dla ściskania grubościennych rurek kompozytowych: a) wysokowytrzymałe włókna węglowe, b) włókna szklane

Fig. 12. Diagram load-displacement for compression of thick-walled composite tubes: a) high strength carbon fibres, b) glass fibres



Rys. 13. Energia niszcząca płyty: a) z włóknami węglowymi, b) z włóknami szklanymi [10]

Fig. 13. Impact energy for cracking of composite plates: a) reinforced with carbon fibres, b) with glass fibres [10]



Rys. 14. Energia zniszczenie w zginaniu udarowym w funkcji objętości próbek: a) osnowa epoksydowa, b) osnowa poliestrowa

Fig. 14. Impact energy in dynamic bending test related to sample volume: a) epoxy matrix, b) polyester matrix

Również w dynamicznej próbie niszczenia płyt kompozytowych udział energii koniecznej dla zniszczenia płyty jest większy dla płyt zbrojonych włóknami szklanymi (rys. 13).

Przewaga kompozytów z włóknami szklanymi uwidacznia się wyraźnie w próbie zginania udarowego przeprowadzonej na młocie Charpy'ego (rys. 14).

Przewaga kompozytów z włóknami szklanymi jest wyraźna i zależności przedstawione na rysunku 14 ilustrują ważniejsze atuty włókien szklanych w konfrontacji z innymi włóknami, w szczególności z włóknami węglowymi.

WNIOSKI

1. W literaturze przedmiotu z lat 1990-2000 przybywa informacji o włóknach węglowych kosztem informacji o włóknach szklanych. Fakt ten ma swoje uzasadnienie w powstaniu nowych typów włókien węglowych o wybranych właściwościach dominujących nad parametrami włókien szklanych.
2. Przewaga włókien węglowych zarysowała się szczególnie w zastosowaniu do wyrobów kompozytowych eksploatowanych w wilgoci i przy zmiennych obciążeniach.
3. Obydwa typy włókien posiadają sobie właściwe cechy i właściwości pozwalające na ich racjonalne wykorzystanie w projektowaniu wyrobów kompozytowych przeznaczonych do pracy w zróżnicowanych warunkach.
4. Można przyjąć, że obok czynnika kosztowego największym atutem włókien szklanych w kompozytach polimerowych jest ich większa zdolność do pochłaniania energii.
5. W działalności projektowej i dydaktycznej ważną rolę spełniają informacje o włóknach organicznych, których właściwości w wielu przypadkach stanowią łącznik pomiędzy dwoma grupami włókien omówionych w niniejszym opracowaniu.
6. Wyniki niniejszego opracowania wskazują na celowość produkcji kompozytów hybrydowych.

LITERATURA

[1] Guigon M., Klinkin M., The interface and interphase in carbon fibre-reinforced composites, Composites 1994, 25, 534-539.
[2] Blumberg H., Fortschritte bei hochfesten Verstarkugsfasern aus Kohlenstoff und Aramid, Werkstoffe und Konstruktion 1989, 3, 203-208.
[3] Rasim C., Neue Werkstoffe im Automobilenbau, VDI Berichte, 670, 1988, 1-20.
[4] Browning C., Hortness I., Effects of Moisture on the Properties of High-Performce Structural Resins and Composites, STP 546, ASTM, 1973, 284-302.
[5] Peel C.J., Aluminium alloys for airframes, Materials at their Limits, 46-49.
[6] Boczkowska A., Kapuścinski J., Puciłowski K., Wojciechowski S., Kompozyty, Wyd. PW, Warszawa 2000.
[7] Leda H., Wasilewicz P., Kropaczewski S., Przydatność ściskania osiowego do oceny grubościennych kompozytów polimerowych z włóknami ciągłymi (w druku).
[8] Hędzelek W., Gajdus P., Leda H., Wpływ wysokowytrzymałych włókien o modyfikowanej i niemodyfikowanej powierzchni na właściwości mechaniczne polimtakrylanu metylu, Protetyka Stomatologiczna, L 3, 165-169.
[9] Leda H., Właściwości zginanych kompozytów polimerowych, Wyd. PP, Poznań 1999.
[10] Kropaczewski S., Właściwości kompozytów polimerowych po obciążeniach udarowych, Praca dyplomowa, Politechnika Poznańska, Poznań 2001.

Recenzent
Ludomir Ślusarski