

**Jan WÓJCIK<sup>\*</sup>, Michał A. MATUSEWICZ, Paweł MERGO, Aleksander WALEWSKI**

<sup>\*</sup>UNIWERSYTET MARII CURIE SKŁODOWSKIEJ, ZAKŁAD TECHNOLOGII ŚWIATŁOWODÓW  
Pl. Marii Curie Skłodowskiej 3, 20-031 Lublin

**Wytrzymałość mechaniczna światłowodów fotonicznych****Dr Jan WÓJCIK**

Dr Jan Wójcik kończył studia chemiczne na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie w 1971. W 1982 roku otrzymał tytuł doktora nauk chemicznych ze specjalnością chemia fizyczna na tej samej uczelni. Prowadzi grupę badawczą technologii światłowodów w Zakładzie Technologii Światłowodów UMCS. Jego zainteresowania badawcze dotyczą projektowania, wytwarzania i metrologii światłowodów do zastosowań telekomunikacyjnych i specjalnych.



e-mail: wojcik@poczta.umcs.lublin.pl

**Dr Paweł MERGO**

Paweł Mergo urodził się w Sokolowie Podlaskim w 1973 roku. W 1997 roku otrzymał tytuł magistra chemii na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, w 2003 roku uzyskał tytuł doktora ze specjalnością chemia fizyczna na tej samej uczelni. Jego zainteresowania badawcze dotyczą projektowania, wytwarzania i metrologii światłowodów do zastosowań telekomunikacyjnych i specjalnych. Jest członkiem Polskiego Stowarzyszenia Fotonicznego.



e-mail: pawel.mergo@poczta.umcs.lublin.pl

**Mgr Michał A. MATUSEWICZ**

Absolwent chemii Uniwersytetu Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie, specjalność fizykochemiczno-teoretyczna. Semestr studiów spędził w Aalborg University w Danii w ramach programu Erasmus. Od lutego 2009 pracownik Zakładu Technologii Światłowodów na UMCS. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Chemicznego.



e-mail: michal.matusewicz@wp.pl

**Mgr Aleksander WALEWSKI**

W 1986 roku ukończył studia na Wydziale Mat-Fiz-Chem UMCS kierunku Chemia Podstawowa i Stosowana. W tymże roku podjął pracę w Pracowni Technologii Światłowodów, gdzie pracuje do dzisiaj. Jest członkiem Polskiego Stowarzyszenia Fotonicznego.



e-mail: alwalewski@wp.pl

**Streszczenie**

Pęknięcie szkła prawie zawsze zaczyna się od defektów na jego powierzchni. Powierzchnia zewnętrzna klasycznych światłowodów jest osłonięta powłokami ochronnymi chroniącymi ją przed oddziaływaniem zewnętrznych czynników chemicznych i mechanicznych. Włókna fotoniczne, oprócz chronionej zewnętrznej powierzchni szkła mają też powierzchnię wewnętrzną nawet o rząd większą od zewnętrznej. Ta wewnętrzna powierzchnia nie jest narażona na działanie czynników mechanicznych, ale nie jest chroniona przed czynnikami chemicznymi, zwłaszcza przed oddziaływaniem pary wodnej. Hipoteza o mniejszej wytrzymałości mechanicznej światłowodów fotonicznych w porównaniu z klasycznymi została wstępnie potwierdzona w naszych poprzednich pracach [1]. Niniejsza praca prezentuje ilościowy opis wytrzymałości mechanicznej dwóch omawianych rodzajów włókien. Światłowodów klasyczny stanowił ślepa próbę dla światłowodu fotonicznego w badaniach wytrzymałości mechanicznej przy użyciu zrywarki Tira Test 2200 przystosowanej do pomiarów wytrzymałości światłowodów. Zarówno histogramy jak i rozkłady Weibulla dla obu włókien ilościowo potwierdzają mniejszą wytrzymałość mechaniczną światłowodów fotonicznych. Dodatkowym potwierdzeniem wyników są faktograficzne badania przelomów światłowodów.

**Słowa kluczowe:** światłowod fotoniczny, światłowod klasyczny, wytrzymałość mechaniczna.

**Mechanic reliability of photonic crystal fibres****Abstract**

Most of the glass fractures start from flaws on the glass surface. The outer surface of optical fibres is protected from the influence of mechanical and chemical factors by a thin layer of polymer protective coating. Photonic crystal fibres have, besides outer glass surface, inner glass surface of even an order of magnitude greater area. This inner surface is not exposed to mechanical factors. However, it is not protected from chemical agents, most importantly – water vapour. Hypothesis of relatively lower mechanical reliability of photonic crystal fibres in comparison to classical optical fibres was initially confirmed in our previous works [1]. This work contains quantitative mechanical reliability description of two kinds of optical fibres mentioned above. The classical and photonic crystal fibre, both manufactured in our laboratory, had their mechanical reliability tested on the Tira Test 2200 tensile testing machine adapted for testing optical fibres. Histograms and Weibull distributions show lower mechanical reliability of photonic crystal fibres. Additional confirmation comes from

fractographic studies of fracture surfaces. The presented work is a part of research carried out in PHOSFOS project within the framework of EU Seventh Framework Programme.

**Keywords:** photonic crystal fibre, classical fibre, mechanical reliability.

**1. Wstęp**

Światłowod fotoniczne dzięki swoim unikalnym właściwościom coraz częściej znajdują zastosowanie w rozmaitych czujnikach, zarówno czynników fizycznych, jak i chemicznych. Skuteczne użycie włókien fotonicznych wymaga kompleksowego poznania ich właściwości, między innymi - wytrzymałości mechanicznej. W przypadku klasycznych światłowodów ze szkła kwarcowego problem ten jest powszechnie znany i był opisywany przez wielu autorów [2, 3], co wynika głównie z masowego zastosowania światłowodów w telekomunikacji. W przypadku światłowodów fotonicznych nie są nam znane prace dokładnie opisujące ich wytrzymałość mechaniczną. W naszej poprzedniej pracy [1] zasugerowaliśmy, że ze względu na rozbudowaną wewnętrzną powierzchnię szkła, mniejsze pole powierzchni szkła w przekroju poprzecznym światłowodu fotonicznego oraz bardziej skomplikowany proces produkcji zwiększający prawdopodobieństwo pojawienia się defektu, należy spodziewać się mniejszej wytrzymałości mechanicznej włókna fotonicznego niż klasycznego światłowodu o tej samej średnicy. W tej pracy przedstawiamy i porównujemy wyniki badania wytrzymałości doraźnej dwóch włókien wytworzonych w naszym Zakładzie: klasycznego i fotonicznego o tej samej średnicy.

**2. Metodyka badania doraźnej wytrzymałości mechanicznej światłowodów**

Znanym faktem jest, że dominującą przyczyną pęknięć włókien szklanych są defekty znajdujące się na powierzchni szkła. Mogą to być zanieczyszczenia, uszkodzenia mechaniczne czy wtrącenia krystaliczne powodujące powstanie mikropęknięcia na powierzchni szkła. Pod wpływem działających naprężeń mikropęknięcia powiększają się, powodując po przekroczeniu pewnej

wielkości zerwanie włókna. Istotny wpływ na wzrost mikropęknięć mają czynniki chemiczne oddziałujące na włókno. Wyróżnić tu należy parę wodną, która wchodzi w reakcję z  $\text{SiO}_2$  tworząc na powierzchni szkła grupy silanolowe. Jeśli proces ten ma miejsce w wąskiej szczelinie, powstaje dodatkowe naprężenie rozkalinujące powodujące szybsze powiększanie mikropęknięcia [4].

Powszechnie stosowanym sposobem pomiaru wytrzymałości mechanicznej światłowodów jest poddawanie ich naprężeniu rozciągającemu w maszynie wytrzymałościowej. Można w ten sposób badać wytrzymałość doraźną i długoczasową włókien. Wytrzymałość doraźną określa się przez pomiar wartości siły powodującej zerwanie włókna, przy stałym przyroście naprężenia. Mierzona jest siła  $F$ , przy której pękają poszczególne próbki, którą przelicza się na naprężenie  $\sigma$ , korzystając z zależności:

$$\sigma = \frac{F}{s} \quad (1)$$

gdzie  $s$  jest polem przekroju włókna.

Otrzymane wyniki przedstawia się w postaci histogramów ukazujących ilość próbek zerwanych dla określonych wartości naprężenia, oraz w postaci statystycznego rozkładu Weibulla określono równaniem:

$$\ln \ln \left( \frac{1}{1 - F_k} \right) = \ln L + m \ln \sigma \quad (2)$$

przy czym  $F_k$  określa prawdopodobieństwo pęknięcia włókna o długości  $L$  przy naprężeniu  $\sigma$ . Parametr  $m$  jest nazywany współczynnikiem Weibulla. Opis badania wytrzymałości długoczasowej, której znajomość pozwala na obliczenie czasu życia włókna wykracza poza ramy niniejszej pracy.

Bardzo istotną informacją pomagającą wyeliminować źródło defektów produkowanych włókien jest znajomość miejsca, w którym rozpoczęło się pęknięcie prowadzące do zerwania światłowodu. Tej informacji może dostarczyć analiza przełomów włókien przeprowadzana pod mikroskopem optycznym. Dzięki fraktografii, oprócz zlokalizowania defektu, można też oszacować jego wielkość i w przybliżeniu określić siłę zrywającą włókno, a także skład chemiczny defektu.

### 3. Część eksperymentalna i wyniki

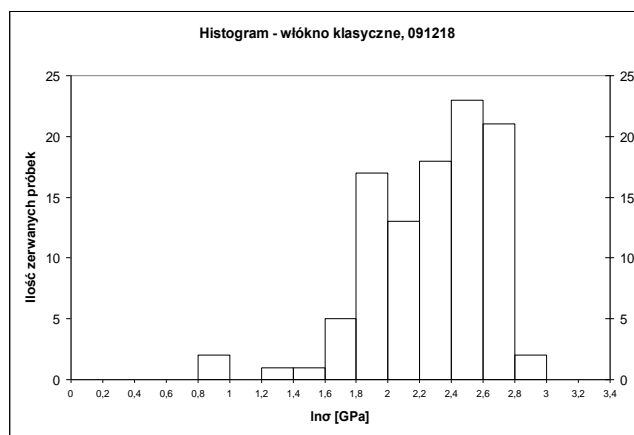
Badaniu wytrzymałości poddaliśmy dwa włókna: klasyczny światłowod o średnicy  $125\mu\text{m}$  oznaczony numerem 091218, oraz włókno fotoniczne o tej samej średnicy, oznaczone numerem 100128. Za minimalną ilość próbek niezbędną do prawidłowego przeprowadzenia badania przyjęliśmy 100. Fragmenty włókna przeznaczone do zerwania pobieraliśmy z losowych miejsc 500m odcinków światłowodów.

Badanie wytrzymałości doraźnej prowadziliśmy na zrywarcie Tira Test 2200, przystosowanej do badania włókien światłowodowych. Próbkę światłowodu o długości  $L=500\text{mm}$  poddawaliśmy rozciąganiu, zgodnie z normami międzynarodowymi, ze stałą prędkością równą 10% długości próbki na minutę, więc w naszym przypadku 50mm/min.

By móc obliczyć naprężenie działające na włókno niezbędna jest znajomość pola powierzchni szkła w przekroju poprzecznym światłowodu. Problem jest trywialny w przypadku światłowodu klasycznego, którego przekrój poprzeczny jest kołowy. Obliczeń dokonaliśmy na dwa sposoby. Pierwszy polegał na pomiarze średnicy włókna pod mikroskopem optycznym. Zmierzyliśmy wymiary ok. 10 próbek z dokładnością do  $1\mu\text{m}$ , co pozwoliło na obliczenie powierzchni z dokładnością do  $2\text{E}-10\text{m}^2$ . Drugi sposób wykonany z taką samą dokładnością był oparty na pomiarze powierzchni włókna na fotografii przekroju poprzecznego przy pomocy programu graficznego GIMP. Wartości obu pomiarów pokryły się w granicach błędów pomiaru wynoszącego 2%. Bar-

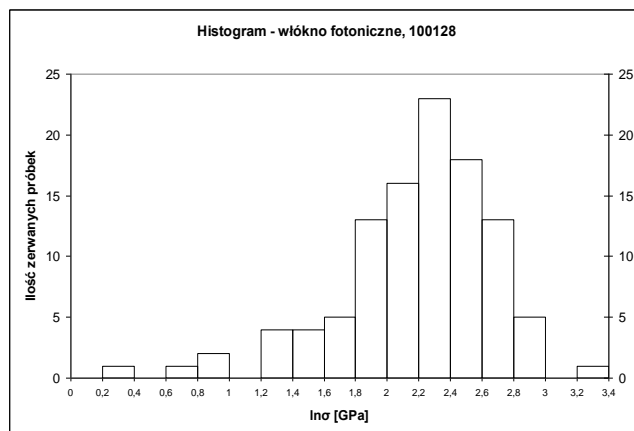
dziej skomplikowany jest pomiar powierzchni szkła w przekroju poprzecznym światłowodu fotonicznego. Sześciokątny kształt i sieć otworów uniemożliwiają proste obliczenie geometryczne. Zastosowaliśmy w tym przypadku pomiar powierzchni włókna na fotografii przekroju poprzecznego przy pomocy programu graficznego GIMP. Dla potwierdzenia otrzymanych wyników obliczyliśmy na podstawie nachylenia zależności wydłużenia względnego od siły i teoretycznej wartości modułu Younga wartość efektywnej powierzchni szkła w przekroju poprzecznym.

Powierzchnia szkła w przekroju poprzecznym włókna klasycznego zmierzona na podstawie fotografii wynosi  $1,26\text{E}-8\text{m}^2$ , a włókna fotonicznego  $1,03\text{E}-8\text{m}^2$ .



Rys. 1. Histogram przedstawiający ilość próbek światłowodu klasycznego pękających w określonych zakresach naprężenia

Fig. 1. Histogram showing the number of classical fibre samples breaking in defined stress ranges

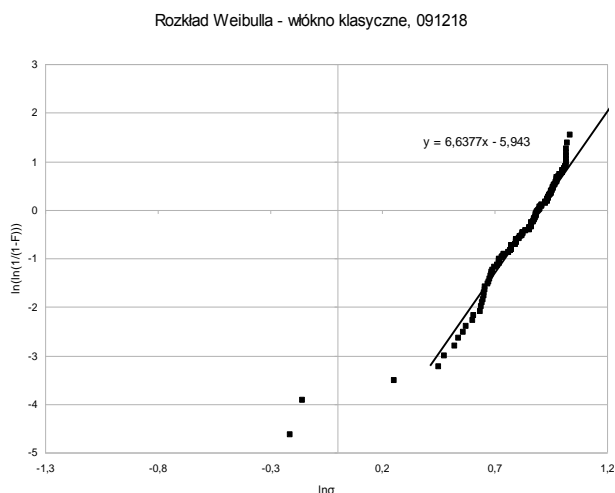


Rys. 2. Histogram przedstawiający ilość próbek światłowodu fotonicznego pękających w określonych zakresach naprężenia

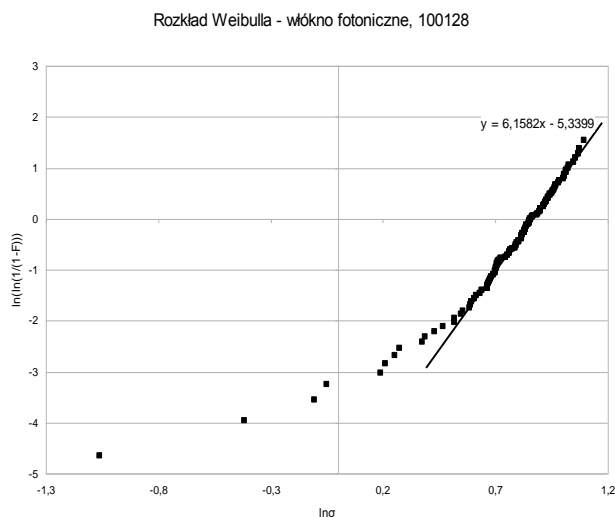
Fig. 2. Histogram showing the number of photonic crystal fibre samples breaking in defined stress ranges

Analizując rysunki 1 i 2 można zauważyć, że w przypadku włókna klasycznego najwięcej próbek pęka w naprężeniach od 1,8 do 2,8GPa. Dla światłowodu fotonicznego zakres, w którym pęka najwięcej próbek to od 1,6 do 3GPa. Pojawia się też kilka odcinków włókna pękającego przy bardzo niskich wartościach naprężenia, czego nie zaobserwowaliśmy w przypadku światłowodu klasycznego.

Różnica może wynikać z różnic w konstrukcji włókien - znacznie bardziej rozbudowanej powierzchni szkła we włóknie fotonicznym, oraz bardziej złożonej procesowi wytwarzania światłowodu fotonicznego.



Rys. 3. Wykres Weibulla dla światłowodu klasycznego  
Fig. 3. Weibull distribution of results obtained for the classical fibre

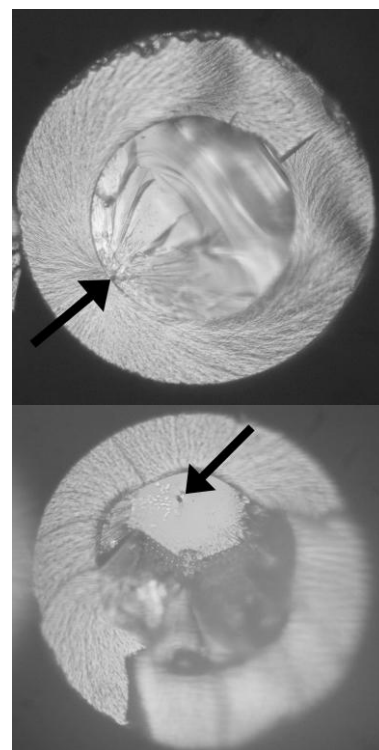


Rys. 4. Wykres Weibulla dla światłowodu fotonicznego  
Fig. 4. Weibull distribution of results obtained for the photonic crystal fibre

Efektywne przekroje obydwu włókien są różne ale to nie ma znaczenia dla interpretacji wykresów Weibulla ponieważ na osiach zmiennej niezależnej odłożony jest logarytm naprężenia a nie siły. Rozkłady otrzymane dla obu włókien różnią się nachyleniem odcinka prostoliniowego. Wartość współczynnika Weibulla dla włókna klasycznego wynosi 6,64, dla włókna fotonicznego 6,16. Wysoka wartość współczynnika świadczy o zmęczeniowym charakterze zerwań, a różnica wartości współczynników Weibulla może wynikać z bardziej skomplikowanego procesu produkcji włókna fotonicznego, w trakcie którego szkło wielokrotnie jest poddane zmianom temperatury.

Próbki światłowodów zerwane przy najmniejszych naprężeniach zostały poddane badaniom fraktograficznym.

Na zdjęciach przełamów włókien (rys. 5) można zauważyć miejsca, w których rozpoczynało się pęknięcie. Dla włókna klasycznego jest ono położone na granicy szkła i lakieru, natomiast w zaprezentowanej próbce światłowodu fotonicznego defekt powodujący pęknięcie jest w obrębie wewnętrznej struktury włókna.



Rys. 5. Zdjęcia przełamów włókna klasycznego (z lewej) i fotonicznego (z prawej)

Fig. 5. Images showing broken fibres: classical (left picture) and photonic (right picture)

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Badaniu wytrzymałości mechanicznej poddano światłowód klasyczny i światłowód mikrostrukturalny o tej samej średnicy. Otrzymane wyniki potwierdzają tezę o większej wytrzymałości doraźnej światłowodów klasycznych niż światłowodów fotonicznych o tej samej średnicy. Badania fraktograficzne pokazały, że we włóknaach fotonicznych istnieje kilka możliwych lokalizacji defektów powodujących zerwanie, podczas gdy dla światłowodów klasycznych zdecydowanie przeważa jedno miejsce występowania defektów. W dalszych pracach planujemy wyznaczenie współczynników trwałości i wytrzymałości długoczasowej włókien klasycznych i fotonicznych o tej samej średnicy.

*Praca została wykonana w ramach projektu PHOSFOS w VII Programie Ramowym UE.*

#### 5. Literatura

- [1] Wójcik J., Matuszewicz M. A., Mergo P., Makara M.: Wytrzymałość mechaniczna światłowodów fotonicznych, PAKGOŚ 04/2009, s. 7-10.
- [2] Kurkijan Ch. R., Krause J. T., Matthewson M. J.: Strength and Fatigue of Silica Optical Fibers. *J. Lightwave Tech.* 7, September 1989, pp.1360-1371.
- [3] Lindholm E. A., Warych E., Whelan D.: Strength and Reliability of Silica Optical Fibers for Automotive Communication Networks. *Proc. SPIE*, Vol. 5663, February 2005, pp. 129-134.
- [4] Michalske T. A., Freiman S. W.: A molecular mechanism for stress corrosion in vitreous silica. *Journal of American Ceramic Society*, 66 (4)/1983, pp. 284-288.