

**Maria MACIEJEWSKA, Jacek ŚWIDERSKI**  
 INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA,  
 ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

## Możliwości spawania włókien optycznych do zastosowań w technice laserowej za pomocą żarnikowej spawarki światłowodowej GPX – 3400

Mgr inż. Maria MACIEJEWSKA

W 2010 r. ukończyła studia na kierunku Elektronika i Telekomunikacja w Wojskowej Akademii Technicznej i otrzymała tytuł zawodowy mgr inż. w specjalności Optoelektronika. Obecnie realizuje studia doktoranckie na Wydziale Chemii i Nowych Technologii oraz pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT na stanowisku starszy inżynier. Zajmuje się techniką światłowodową do zastosowań w konstrukcji laserów włóknowych.



e-mail: mmaciejewska@wat.edu.pl

Dr inż. Jacek ŚWIDERSKI

Jacek Świdorski (ur. 25 sierpnia 1974 r. w Gostyninie) jest absolwentem Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. W roku 1999 uzyskał tytuł zawodowy mgr inż. w specjalności „Systemy optoelektroniczne”, zaś w roku 2006 uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w zakresie optoelektroniki. Obecnie pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego. Jest specjalistą w zakresie laserów ciała stałego, w szczególności laserów światłowodowych.



e-mail: jswiderski@wat.edu.pl

### Streszczenie

Obecnie większość dostępnych komercyjnie spawarek światłowodowych bazuje na wyładowaniu łuku elektrycznego. Konkurencyjnym rozwiązaniem są najnowsze spawarki żarnikowe, w których proces spawania zachodzi wewnątrz grafitowego żarnika. W artykule przedstawiono możliwości spawania włókien optycznych pod kątem zastosowań w technice laserowej za pomocą żarnikowej spawarki światłowodowej GPX-3400 firmy Vytran, która według naszej wiedzy jest obecnie jedynym sprzętem tego typu w Polsce. Ponadto zaprezentowano możliwości obcinania światłowodów (w tym obcięcia pod kątem) za pomocą obcinarki LDC-200 G oraz wykonywania komponentów światłowodowych takich jak przewężki, czy zakończenia typu end – cap.

**Słowa kluczowe:** spawanie światłowodów, żarnik, obcięcie światłowodu, end – cap, przewężka.

### Splicing capabilities of optical fibers used in laser technology with the use of a filament fusion splicer GPX – 3400

#### Abstract

Possibilities of optical fibers splicing and fiber cleaving with the use of currently unique in Poland – the filament fusion splicer GPX-3400 are reported in the paper. Our system, depicted in Fig. 8, consists of the GPX-3400, the LDC-200 G cleaver and the PTR-200 XLR recoater made by Vytran Company. Nowadays most of commercially available fiber splicers, applied particularly in telecom networks are based on arc – discharge method [1, 4], which has some significant limitations. Alternative sources for fiber splicing are: CO<sub>2</sub> laser [6, 7], chemical flame [8] and filament made of resistively heated material and applied in GPX-3400. In this paper we discuss the possibilities of processing different types of optical fibers (PM, PCF, LMA, double – clad) with the use of Vytran Company equipment. We analyze fiber end face cleaved by the LDC-200 G and investigate angled cleaving for Corning SMF-28e (fig. 3). Furthermore, we discuss end caps fabrication, review methods of fiber splicing – especially filament fusion splicing, describe imaging system in the GPX-3400, splice process, fire polishing and tapering. The filament fusion technology makes the GPX-3400 a very flexible glass processing system for splicing optical fibers ranging from 80 μm to 1,5 mm and many others applications such as: fabrication of end caps, couplers, combiners, tapers, thermal core expansion, mode adapters and NA converters. The GPX-3400 provides everything that is essential in fiber processing in order to develop robust all – fiber laser systems.

**Keywords:** fiber fusion splicing, filament, fiber cleaving, end cap, taper.

### 1. Wstęp

Niskostratne spawanie włókien optycznych i komponentów światłowodowych (m.in. izolatorów optycznych, siatek Bragga, sprzęgaczy światłowodowych) jest kluczowym procesem w konstrukcji laserów i wzmacniaczy włóknowych wykonanych całkowicie w technologii światłowodowej („all – fiber”).

Układy laserowe tego typu stanowią nowość naukową i techniczną ostatnich kilkunastu lat i mogą być stosowane w wielu dziedzinach gospodarki, m.in.: telekomunikacji, przemyśle, wojsku oraz medycynie. O szerokich możliwościach aplikacyjnych laserów włóknowych typu „all – fiber” decydują ich zalety, wśród których należy wymienić kompaktowość, niezawodność, możliwość miniaturyzacji oraz zamknięcie wiązki wewnątrz struktury włókna, czego konsekwencją są bardzo dobra jakość wiązki ( $M^2 \approx 1$ ), brak zanieczyszczeń w torze optycznym i w dużym stopniu niewrażliwość na czynniki zewnętrzne, takie jak: wilgoć, kurz, temperatura.

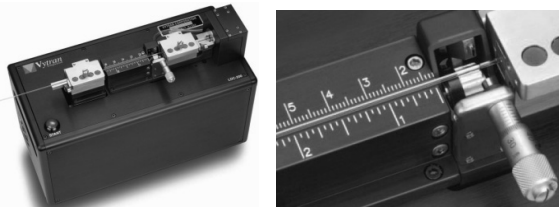
W technice laserowej decydujące jest utworzenie połączenia światłowodów o minimalnych stratach optycznych, szczególnie w przypadku laserów dużych mocy i zapewnienie wysokiej wytrzymałości. Proces spawania światłowodów składa się jednak z wielu etapów [1] (zdjęcie pokrycia, oczyszczenie włókna, obcięcie, wyrównanie światłowodów, formowanie połączenia, pomiar lub estymacja strat oraz pokrycie lakierem), dlatego w celu osiągnięcia spawu o najwyższej jakości konieczne jest prawidłowe przeprowadzenie każdego z nich. O ile spawanie standardowych światłowodów stosowanych w telekomunikacji (o średnicy płaszczka 125 μm) jest procesem dobrze znanym i opanowanym, to spawanie włókien o większych średnicach, w szczególności światłowodów aktywnych dwupłaszczkowych, światłowodów fotonicznych oraz włókien Large Mode Area nie jest zadaniem trywialnym i wymaga odpowiedniego sprzętu oraz specjalistycznej wiedzy. W dalszej części artykułu omówione zostaną możliwości obróbki światłowodów za pomocą obcinarki światłowodowej LDC<sup>1</sup>-200 G oraz spawarki żarnikowej GPX<sup>2</sup>-3400 firmy Vytran.

### 2. Obcięcie światłowodu

Obcięcie światłowodu jest jedną z najważniejszych czynności przygotowania włókna, decydującym o jakości spawu, ponieważ w celu zesparowania dwóch światłowodów konieczne jest uzyskanie gładkich czoł, prostopadłych do osi włókna. W obcinarce LDC-200 G firmy Vytran przedstawionej na rys. 1 zasadniczymi podzespołami są dwa bloki trzymające włókna oraz diamentowy nóż, sterowane przez silniki krokowe. W procesie obcinania światłowodów wykorzystywana jest metoda „naprężenia i nacięcia”. Po załadowaniu włókna lewy blok trzymający światłowód odsuwany jest w lewą stronę nadając naprężenia o zaprogramowanej wartości, a diamentowe ostrze nacina światłowód. Nacięcie rozchodzi się prostopadle do przyłożonych naprężeń, dlatego w celu uzyskania płaskich czoł naprężenia muszą być przyłożone dokładnie w osi światłowodu.

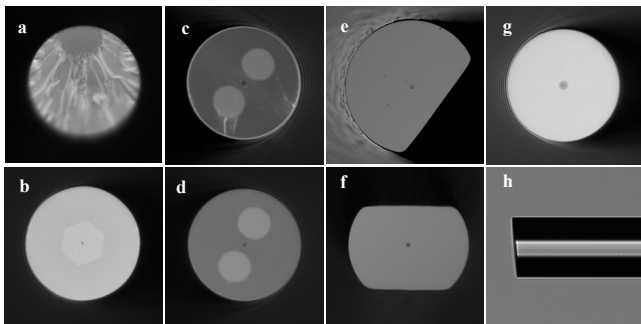
<sup>1</sup> LDC - Large Diameter Cleaver

<sup>2</sup> GPX - Glass Processing and Fusion Splicing System for Large Diameter Fibers



Rys. 1. Obcinarka światłowodowa LDC-200 G firmy Vytran  
Fig. 1. The LDC-200 G made by Vytran Company

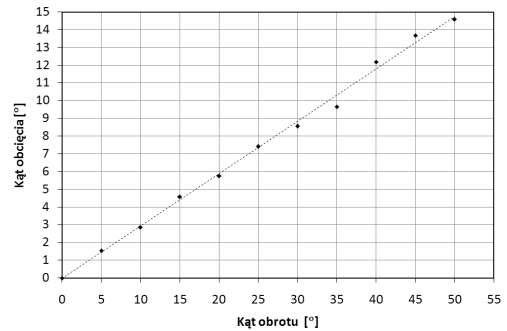
Bardzo istotnym zagadnieniem w celu uzyskania płaskiego czoła światłowodu bez defektów powierzchni jest dobór odpowiedniej wartości naprężenia włókna. W LDC-200 G możliwy jest automatyczny dobór parametrów obcięcia światłowodu do jego średnicy, jednak opcja ta nie zawsze daje najlepsze efekty. Na rys. 2a przedstawione jest czoło światłowodu obcięte przy zbyt wysokich naprężeniach. Na zdjęciu wyraźnie widoczne jest miejsce nacięcia włókna. Z kolei na rys. 2c i 2d przedstawione są zdjęcia tego samego światłowodu PM typu PANDA odpowiednio przy automatycznie dobranym do średnicy (za wysokim) i optymalnym naprężeniu. Za pomocą LDC-200 G można obcinać światłowody o średnicy płaszczka od 80  $\mu\text{m}$  do 1,25 mm, w tym również światłowody niecylicydryczne oraz światłowody o różnych parametrach naprężeniowych takich jak PCF czy PM, co zostało przedstawione na pozostałych zdjęciach na rys. 2. Ponadto obcinarka LDC-200 G jest wyposażona w wewnętrzną pompę próżniową znacznie ułatwiającą umieszczenie światłowodu w blokach oraz podręczny sterownik do zmiany parametrów procesu obcinania.



Rys. 2. Zdjęcia światłowodów obciętych za pomocą LDC-200 G; a – światłowod SMF obcięty przy zbyt dużych naprężeniach; b – światłowod fotoniczny; c, d – światłowod PM obcięty przy automatycznie dobranych do średnicy i optymalnych naprężeniach; e, f – światłowod aktywny o największym wymiarze 400  $\mu\text{m}$  typu „D” i typu „stadion”; g, h – światłowod SMF obcięty pod kątem 4,5°

Fig. 2. Fibers cleaved by the LDC-200 G; a – SMF cleaved with too high tension; b – PCF fiber; c, d – PM fiber cleaved automatic and with optimal tension; e, f – D type and stadium type active fiber 400  $\mu\text{m}$  size; g, h – SMF cleaved at the angle of 4.5°

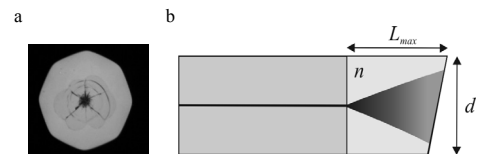
Obcinarka LDC-200 G posiada również opcję obcinania światłowodu pod kątem (rys. 2g i 2h), stosowaną powszechnie w technice laserowej w celu minimalizacji odbicia wstecznego od czoła światłowodu. Do obcinania światłowodów pod kątem prawy blok, w którym umieszczony jest koniec światłowodu obracany jest o kąt od 0° do 90°. W wyniku skręcenia włókna powstają dodatkowe naprężenia skośne, a ponieważ pęknięcie propaguje się prostopadle do działających naprężeń koniec światłowodu obcinany jest pod kątem w stosunku do osi włókna. Kąt obrotu włókna nie odpowiada jednak kątowi obcięcia światłowodu. Dla światłowodu Corning SMF-28e przeprowadzone zostały pomiary kąta obcięcia włókna (mierzonego pomiędzy płaszczyzną czołową, a płaszczyzną prostopadłą do osi włókna) w zależności od kąta obrotu światłowodu, których wyniki przedstawione są na rys. 3. Za pomocą LDC-200 G możliwe jest obcięcie światłowodu pod kątem większym niż 15°, jednak wówczas na powierzchni czoła światłowodu pojawiają się znaczne defekty.



Rys. 3. Zależność kąta obcięcia od kąta obrotu końca włókna dla światłowodu Corning SMF-28e

Fig. 3. The cleave angle as a function of rotation angle for Corning SMF-28e optical fiber

Obcięcie światłowodu pod kątem stosowane jest w zakończeniach typu end – cap do laserów włóknowych, które mają za zadanie zmniejszenie gęstości mocy na jednostkę powierzchni i podwyższenie progu uszkodzenia czoła światłowodu (który dla kwarcu jest 2 – 5 razy niższy niż w materiale objętościowym [3]). Szczególnie w impulsowych laserach włóknowych dużej mocy uszkodzenie czoła światłowodu (rys. 4a) jest jedną z najczęstszych przyczyn uszkodzenia układu, a wykonanie end – capów może być rozwiązaniem tego problemu.



Rys. 4. a – Zdjęcie uszkodzonego czoła światłowodu, b – schematyczny rysunek zakończenia typu end – cap

Fig. 4. a – Damaged fiber end face, b – schematic view of an end cap

Stosując zasady optyki geometrycznej można wyprowadzić wzór na maksymalną długość end – capa, która zależy od apertury numerycznej światłowodu  $NA$ , jego średnicy  $d$  oraz współczynnika załamania  $n$  i może być opisana następującym równaniem:

$$L_{\max} = \frac{d\sqrt{1-4n^2NA^2}}{2nNA} \quad (2)$$

Wykonywanie zakończeń end – cap możliwe jest za pomocą spawarki światłowodowej GPX-3400 i obcinarki LDC-200 G. W praktyce światłowod, do którego ma być wykonany end-cap obcinany jest prostopadle, przenoszony do spawarki GPX-3400 i dospawany jest odcinek światłowodu bez rdzenia, który następnie obcinany jest pod kątem na odpowiedniej długości. Cały proces znacznie ułatwia kompatybilność spawarki i obcinarki firmy Vytran, ponieważ przenoszone są uchwyty do trzymania światłowodu z systemem V – rowków, które są wymiennie stosowane w spawarce i obcinarce. Dlatego obcięcie światłowodu za pomocą LDC-200 G, zapewnia jednocześnie odpowiednią długość światłowodu do spawania. Ponadto użytkownik ma do wyboru uchwyty o różnym rozmiarze oraz kącie rozwarcia V – rowków 60° lub 90°, tak aby uzyskać stabilne położenie włókna o różnym kształcie i rozmiarze płaszczka w zakresie 80  $\mu\text{m}$  – 1,5 mm.

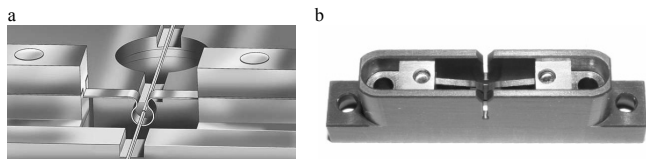
### 3. Metody spawania światłowodów

Ze względu na konieczność dokładnej kontroli parametrów spawania, stabilność w czasie oraz wysoką temperaturę mięknięcia i topnienia szkła istnieje niewiele źródeł ciepła nadających się do spawania światłowodów. Obecnie najpopularniejszą metodą spawania światłowodów stosowaną powszechnie do spawania światłowodów w sieciach telekomunikacyjnych o średnicy 125  $\mu\text{m}$  jest spawanie za pomocą wyładowania łuku elektrycznego.

go. W metodzie tej wykorzystuje się wysokie napięcie elektryczne indukowane pomiędzy dwiema lub trzema elektrodami umieszczonymi w powietrzu. W obszarze łuku elektrycznego umieszczane są końce światłowodów, które po podgrzaniu do temperatury mięknięcia dosuwane są do siebie i formowane jest połączenie. Metoda spawania światłowodów w łuku elektrycznym umożliwia pracę w warunkach polowych jednak posiada szereg ograniczeń. Po pierwsze rozkład ciepła pomiędzy elektrodami zależy od stanu elektrod oraz od warunków otoczenia, takich jak ciśnienie, temperatura, wilgotność. Ponadto światłowod umieszczony pomiędzy elektrodami działa jak izolator, dlatego spawarki łukowe najczęściej dedykowane są do spawania światłowodów o niewielkim rozmiarze – np. 125  $\mu\text{m}$  i są mało elastyczne pod względem innych zastosowań. W celu pokonania ograniczeń związanych z rozmiarem światłowodu powstały spawarki łukowe z 3 elektrodami, które są dostępne komercyjnie i umożliwiają spawanie światłowodów o średnicy powyżej 1 mm [4].

Oprócz łuku elektrycznego do spawania światłowodów stosowane są żarniki wykonane z materiałów ogniotrwałych [1, 2, 5], lasery [6, 7] (najczęściej laser  $\text{CO}_2$  ze względu na wysoką absorpcję promieniowania o długości fali 10,6  $\mu\text{m}$  w kwarcu) oraz płomień chemiczny – tlenowodorowy lub propanowy [1, 8]. Ostatnie dwa rodzaje spawania światłowodów są coraz rzadziej stosowane i ze względu na specyfikę wyłącznie w warunkach laboratoryjnych.

Duży potencjał zarówno w aplikacjach przemysłowych jak i naukowych mają spawarki żarnikowe. W spawarce tego typu źródłem ciepła jest żarnik rozgrzewany na skutek przepływu prądu przez element o wysokim współczynniku rezystancji. W celu uzyskania jednorodnego rozkładu temperatury wokół światłowodów i możliwości usunięcia zespawanych włókien najczęściej żarniki wykonane są w kształcie greckiej litery „omega” (rys. 5) z wольframu lub grafitu.



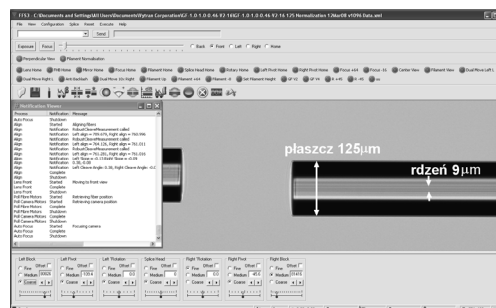
Rys. 5. Żarnik typu „ $\Omega$ ” stosowany w spawarce GPX-3400; a – rysunek schematyczny [5]; b – zdjęcie rzeczywiste żarnika

Fig. 5. The  $\Omega$ -type graphite filament for the GPX-3400; a – schematic view [5]; b – photo of the filament

W spawarce GPX-3400 używane są ręcznie wykonywane żarniki grafitowe o różnym rozmiarze, co umożliwia spawanie światłowodów o średnicy od 80  $\mu\text{m}$  do 1,5 mm. Aby zapobiec utlenianiu się grafitu w wysokiej temperaturze i zachować czyste końce włókien w procesie spawania używany jest gaz obojętny – argon o wysokiej jakości (argon 6.0 czystość > 99,9999%). Ze względu jednak na konieczność stosowania gazu oczyszczającego spawarki żarnikowe są mało mobilne i nie nadają się do zastosowań polowych. Z drugiej strony spawarki żarnikowe w przeciwieństwie do spawarek łukowych mają możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur – od około 100 do 3000  $^{\circ}\text{C}$  (który może być przestrajany w sposób ciągły), co stwarza możliwości spawania światłowodów plastikowych oraz decyduje o dużej elastyczności pod względem zastosowań. Za pomocą GPX-3400 oprócz spawania światłowodów możliwe jest wykonywanie przewęzek, konwerterów średnicy modu i apertury numerycznej, end – capów oraz sprzęgaczy światłowodowych.

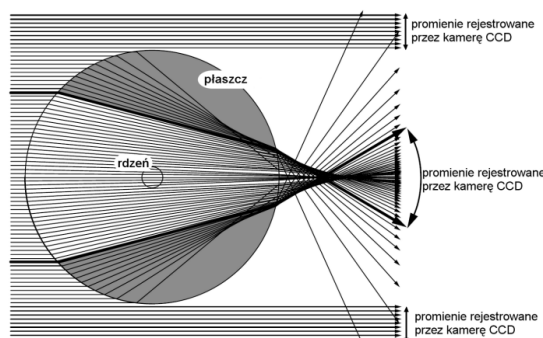
#### 4. Obrazowanie włókna

Spawarka GPX-3400 wyposażona jest w system obrazowania włókna składający się z kamery CCD, 3 diod LED (dwóch umieszczonych w blokach trzymających włókna) oraz układu 4 zwierciadeł umożliwiających podgląd czoła światłowodu (rys. 2a–2g) oraz widok poprzeczny z dwóch przeciwległych stron (rys. 6).



Rys. 6. Interfejs graficzny użytkownika oprogramowania spawarki GPX-3400  
Fig. 6. The GPX-3400 software graphical user interface

Większość produkowanych obecnie światłowodów charakteryzuje się cylindrycznym kształtem. Wprowadza to pewne zniekształcenia w obrazowaniu włókna i może prowadzić do błędnej interpretacji obrazu poprzecznego widoku światłowodu. Powierzchnia płaszczka światłowodu ze względu na różnicę współczynnika załamania otoczenia (powietrza) i materiału, z którego wykonany jest światłowod zachowuje się jak soczewka, która powiększa obszar rdzenia. Dlatego na obrazie widocznym w oprogramowaniu GPX proporcje pomiędzy rozmiarem rdzenia i płaszczka światłowodu w widoku poprzecznym („back view” lub „front view”) nie są zachowane. Ponadto na obrazie włókna widoczny jest zawsze jasny obszar w środkowej części światłowodu pomiędzy dwoma ciemnymi paskami. Otóż analizując bieg promieni przez światłowod [1], zgodnie z prawem Snella niektóre z nich przechodząc przez płaszcz są załamywane pod tak dużym kątem, że nie wpadają do obiektywu, co zostało pokazane na rysunku poniżej.

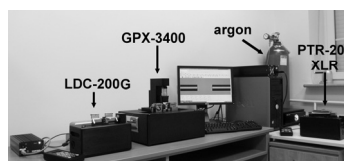


Rys. 7. Bieg skolimowanych promieni świetlnych przez światłowód cylindryczny ze skokową zmianą współczynnika załamania. Promienie przechodzące przez płaszcz światłowodu zaznaczony szarym kolorem nie są rejestrowane przez kamerę CCD, co odpowiada czarnym pasmom na obrazie widoku poprzecznym światłowodu [1]

Fig. 7. Collimated rays tracing through a cylindrical, step-index fiber. Rays passing through the shaded portion of the fiber's cladding are not captured by the optical system, that responds black bands on the image of side view of the fiber [1]

#### 5. Spawanie i wykonywanie komponentów światłowodowych za pomocą GPX-3400

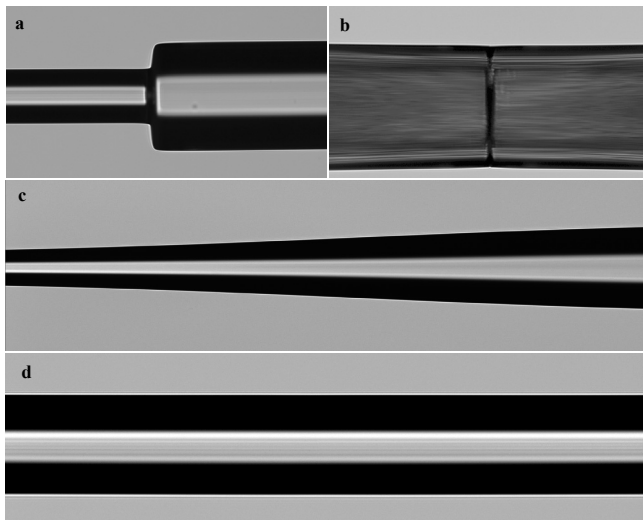
Stworzenie procesu spawania światłowodów odbywa się za pomocą komputera (rys. 8) i dołączonego oprogramowania, którego interfejs graficzny przedstawiony jest na rys. 6.



Rys. 8. Stanowisko laboratoryjne do spawania światłowodów  
Fig. 8. A laboratory work station for fiber fusion splicing

Po umieszczeniu światłowodów w blokach trzymających włókna i wprowadzeniu odpowiednich parametrów spawania możliwe jest spawanie w trybie automatycznym lub manualnym.

Bloki trzymające włókna sterowane są przez silniki krokowe, które umożliwiają przesuw włókna wzdłuż osi (w kierunku Z) z minimalnym krokiem  $0,25 \mu\text{m}$ , pozycjonowanie X – Y z dokładnością  $0,02 \mu\text{m}$  oraz obrót włókna o  $180^\circ$  z krokiem  $0,1^\circ$  i dokładnością pomiaru kąta  $0,02^\circ$ . W procesie automatycznym na podstawie analizy obrazu wykonywane jest kolejno wyrównanie włókien, dosunięcie ich do siebie na odpowiednią odległość, ponowne wyrównanie, wysunięcie żarnika, spaw i estymacja strat. Przy spawaniu manualnym o przeprowadzeniu każdej z wymienionych czynności decyduje operator. Po zoptymalizowaniu procedury spawania danego rodzaju światłowodów wygodnym rozwiązaniem jest zapisanie skryptu zawierającego kolejne etapy i parametry spawania, co umożliwi w przyszłości spawanie automatyczne według utworzonego skryptu, a operator będzie zobligowany jedynie do naciśnięcia przycisku „START” oraz umieszczenia, a po procesie spawania usunięcia i zabezpieczenia zespanych światłowodów. Zmniejszenie roli operatora w procesie spawania jest jak najbardziej pożądane, ponieważ, zmniejsza ryzyko popełnienia błędów podczas realizacji procedury. Do zabezpieczenia spawu można wykorzystać recoater PTR-200 XLR, który umożliwia pokrycie materiałem ochronnym odcinka światłowodu o maksymalnej długości 10 cm. Jako pokrycie włókna wykorzystywany jest płynny akryl, który utwardzany jest przez naświetlanie promieniowaniem UV emitowanym przez lampy umieszczone w PTR – 200 XLR w regulowanym czasie od 0 do 60 s. Prawidłowo zabezpieczony światłowod jest elastyczny i ma właściwości zbliżone do włókna z pokryciem przed recoatingiem.



Rys. 9. Wybrane wyniki pracy uzyskane na spawarce GPX-3400; a – spaw światłowodów o różnej średnicy 125:250  $\mu\text{m}$ ; b – spaw światłowodów fotonicznych; c – przewężka 400:128  $\mu\text{m}$ ; d – niskostratny spaw światłowodów SMF (w przypadku spawów wysokiej jakości miejsce spawu trudne do rozróżnienia)

Fig. 9. Selected results of using the GPX-3400; a – splice of different diameter fibers 125:250  $\mu\text{m}$ ; b – PCF to PCF splice; c – taper 400:128  $\mu\text{m}$ ; d – low loss SMF to SMF splice (in a high quality splice a splice location is difficult to distinguish)

Spawarka GPX-3400 posiada dodatkowo opcję „fire polishing”, która może być aktywowana w celu zwiększenia wytrzymałości spawu lub uzyskania termicznego rozszerzenia rdzenia (ang. TEC – Thermally Expanded Core) i wykonania konwertera pola modu. Podczas „fire polishing” następuje skanowanie światłowodu lub miejsca spawu żarnikiem. Żarnik rozgrzany do odpowiedniej temperatury przemieszcza się kilka razy w prawo i w lewo. Skanowanie spawu może poprawić wytrzymałość mechaniczną oraz niezawodność połączenia, w wyniku ogrzania światłowodu do

temperatury, w której napięcie powierzchniowe zniweluje defekty powierzchni włókna powstałe najczęściej, podczas usuwania płaszczka. Z kolei w procesie TEC żarnik rozgrzewany jest do temperatury zbliżonej lub nieco wyższej niż temperatura spawania (około  $2000^\circ\text{C}$ ). Następnie w wyniku dyfuzji domieszek następuje zwiększenie średnicy rdzenia na odcinku, który był skanowany oraz zmniejszenie różnicy współczynników załamania rdzenia i płaszczka światłowodu. Wykorzystując tę metodę średnica pola modu jednomodowego światłowodu domieszkowanego germanem może zostać powiększona nawet trzykrotnie [9].

Inną metodą zmiany średnicy pola modu jest przewężanie (rys. 9c). W tym przypadku zmienia się rozmiar rdzenia, a różnica współczynników załamania rdzenia i płaszczka pozostaje bez zmian. Podczas wykonywania przewężek jeden z bloków trzymających włókna pozostaje nieruchomy, a drugi porusza się w przeciwną stronę rozciągając włókno. Do podglądu procesu służy monitor naprężeń, pokazujący naprężenia na jednym z wybranych bloków, w którym znajduje się światłowod. Na rys. 9. przedstawiono przykładowe wyniki pracy na spawarce żarnikowej GPX-3400.

## 6. Wnioski

Obecnie spawarka żarnikowa GPX-3400 wraz z obcinarką LDC-200 G tworzy unikalny w skali krajowej zintegrowany system do obróbki światłowodów o średnicy płaszczka od 80  $\mu\text{m}$  do 1,25 mm. Za pomocą sprzętu firmy Vytran możliwe jest spawanie światłowodów pasywnych i aktywnych w tym również światłowodów niecylicydrycznych, światłowodów fotonicznych, światłowodów typu LMA, PM, a nawet światłowodów plastikowych. Możliwość kątego obciążenia włókna oraz dokładna kontrola i szeroki zakres zmian parametrów decydują o różnorodnych możliwościach aplikacyjnych tego sprzętu. Oprócz spawania światłowodów spawarka GPX-3400 umożliwia wykonywanie end-capów, sprzęgaczy, kombajnerów światłowodowych, przewęzek oraz termiczne rozszerzenie rdzenia włókna, co skutkuje możliwością wykonywania konwerterów pola modu i konwerterów apertury numerycznej. Do najważniejszych niedoskonałości sprzętu należy zaliczyć przede wszystkim długość włókna potrzebną do przygotowania, która wynosi około 9,5 cm oraz sporadycznie pojawiające się błędy oprogramowania, występujące najczęściej po przerwaniu przez operatora jakiegoś procesu. Spawarka światłowodowa GPX-3400 jest zaawansowanym sprzętem najnowszej technologii i umożliwia wszystko, co jest konieczne do tworzenia układów laserowych w technologii „all – fiber”.

## 7. Literatura

- [1] Yablon A. D.: Optical fiber fusion splicing, Springer, Berlin 2005.
- [2] Wang B., Mies E.: Review of fabrication techniques for fused fiber components for fiber lasers, Proc. SPIE 7195, 2009.
- [3] Smith A.V., Do B. T.: Bulk and surface damage of silica by picosecond and nanosecond pulses at 1064 nm, Appl. Opt. vol. 47, 2008.
- [4] Fitel S184PM Fusion Splicer, The Furukawa Electric Co., Information/ Data sheet, <http://www.interlab.pl/>.
- [5] [www.vytran.com](http://www.vytran.com).
- [6] Chong J. H., Rao M.: Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber, Opt. Express 11, 2003.
- [7] Fujita H, Suzaki Y, Tachibana A.: Optical fiber splicing technique with a CO(2) laser, Appl. Opt. vol. 15, 1976.
- [8] Krause J.: Method for glass fiber splicing by flame fusion, US patent, US 4713105, 1987.
- [9] Wang B., Mies E.: Advanced topics on fusion splicing of specialty fibers and devices, Proc. SPIE 6781, 2007.