

# APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

## Aparatura do mikroingerencji wiązką lasera w strumieniu wody

JAN SZUKALSKI<sup>1</sup>, RYSZARD WODNICKI<sup>2</sup>, JERZY KALWAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CENTRALNY OŚRODEK BADAWCZO-ROZWOJOWY APARATURY BADAWCZEJ I DYDAKTYCZNEJ  
COBRABiD sp. z o.o.

<sup>2</sup>SOLARIS-OPTICS

**Słowa kluczowe:** mikrojety, mikroobróbka, mikroingerencja

### STRESZCZENIE

Przedmiotem artykułu jest opracowanie i budowa stanowiska do badań mikroingerencji promieniowania laserowego w otulinie cieczy w różnego rodzaju materiały, takie jak cienkie i grube folie, tkanki ludzkie i zwierzęce. Metoda polega na doprowadzaniu do obrabianego materiału wiązki promieniowania laserowego skoncentrowanego w strumieniu wody o średnicy 50-200  $\mu\text{m}$  wypływającym z dyszy pod ciśnieniem od 5 do 30 MPa. Strumień wody, spełniający rolę światłowodu, doprowadza energię do miejsca obróbki materiału, bądź miejsca ingerencji w tkance. Istotnym jest to, że strumień (energia) jest skoncentrowany od czoła głowicy do odległości ok. 50 mm i to jest obszar roboczy. Zainteresowanymi eksperymentami nad mikroingerencją w tkanki są badacze z obszaru medycyny, weterynarii, kosmologii i biologii.

### Equipment for laser beam microlinterference in a water jet

**Keywords:** microjets, micro-processing, microinterference

### ABSTRACT

The subject of this article is the development and construction of a micro-application, liquid lagged laser radiation workstation for use in research on various materials such as metal and polyester foils as well as human or animal tissues. The method is based on applying a laser radiation beam concentrated in a 5-200  $\mu\text{m}$  in diameter water stream flowing out of the nozzle at a pressure of 5-30 MPa to the material in question. The water stream, acting as fibre optics, directs energy to the area of the material being machined or the area of micro-application on the tissue. It is important to note that the energy is constantly concentrated from the front of the nozzle head up to a distance of approximately 50 mm, at a further distance significant energy dispersion takes place. Researchers in the fields of human and veterinary medicine, cosmetology and biology have shown interest in equipment that enables micro-application experimentation on tissue samples.

## 1. WSTĘP

Od wielu lat lasery są powszechnie wykorzystywane w procesach technologicznych i obróbce materiałów. W szczególności wiązka laserowa wykorzystywana jest do cięcia, spawania, obróbki cieplnej, a także znakowania wyrobów.

W zastosowaniu do cięcia materiałów metodą konkurencyjną jest wykorzystanie strumienia wodnego, który przy podobnej precyzji daje gładkie krawędzie cięcia. Metoda ta stosowana jest głównie do cięcia metali, takich jak stal nierdzewna i narzędziowa, aluminium, tytan, a także do cięcia ceramiki. Skuteczny efekt cięcia strumieniem wody, do której dodaje się ścierniwo, uzyskuje się w urządzeniach, w których głowica tnąca wytwarza strumień o średnicy 0,2 – 1,0 mm i prędkości ok. 1000 m/s. Do ukształtowania takiego strumienia stosuje się dysze wykonywane z najtwardszych materiałów, takich jak diament lub szafir.

Połączenie obu tych metod poprzez wprowadzenie strumienia laserowego do strumienia wodnego stwarza nowe możliwości zastosowań wiązki laserowej. Badania z wykorzystaniem tej metody rozpoczęto w 1998 r. na Politechnice w Lozannie stosując lasery o dużych mocach. Bardzo istotną zaletą tej metody jest brak konieczności ogniskowania wiązki laserowej na obrabianym elemencie, co pozwala na uzyskiwanie znacznie większych głębokości wnikania.

## 2. CEL PRACY

Celem pracy jest przedstawienie układu do obróbki różnych materiałów za pomocą promieniowania laserowego w światłowodzie, którym jest laminarny strumień cieczy. Wykorzystano promieniowanie laserów o małych mocach (maksymalnie 2 W) i średnicy laminarnego strumienia wodnego poniżej 0,15 mm. Rozwiązanie takie jest przeznaczone do wszelkich zastosowań w dziedzinie mikroobróbki, tam gdzie nie można wykorzystać metod konwencjonalnych wymagających ogniskowania wiązki światła na obiekcie. Możliwość prowadzenia mikroobróbki w dowolnej odległości od końca urządzenia (na obszarze, w którym strumień cieczy jest laminarny), stwarza duże perspektywy zastosowań tej techniki w mikrochirurgii i kosmetyce, szczególnie kiedy nośnikiem wiązki promieniowania laserowego nie jest woda, lecz odpowiednio dobrana ciecz farmakologiczna.

## 3. KONCEPCJA ROZWIĄZANIA – KONSTRUKCJA URZĄDZENIA

W niniejszej pracy opisano model użytkowy stanowiska do badań mikroingerencji promieniowania laserowego w światłowodzie wodnym w takie materiały jak cienkie i grube folie oraz tkaniki ludzkie i zwierzęce. Potrzebę opracowania i konstrukcji tego rodzaju urządzenia stwierdzono podczas badań metod mikroobróbki płytek krzemowych, prowadzonych w latach 1999-2000 w Instytucie Inżynierii Precyzyjnej i Biomedycznej Politechniki Warszawskiej (IIPiB) w ramach Programu Priorytetowego Nowe Technologie.

Opisane rozwiązanie polega na doprowadzaniu do obrabianego materiału wiązki światła laserowego skoncentrowanego w strumieniu wody o średnicy 50-200  $\mu\text{m}$  wyptywającym z głowicy. Urządzenie zasilano wodą o ciśnieniu 5-30 MPa. Strumień wody, spełniający rolę światłowodu, doprowadza wiązkę laserową do miejsca obróbki. Rozpoznanie stanu techniki światłowodowej w tej dziedzinie wykazało, że badania tego rodzaju obróbki były prowadzone w latach 90. jedynie na Politechnice w Lozannie w Szwajcarii [1]. W roku 1997 powstała w parku technologicznym tej politechniki firma SYNOVA. W 2003 roku zaczęła ona oferować urządzenia oparte na nowej metodzie w zastosowaniu do wysokoenergetycznej obróbki materiałów, prawdopodobnie elementów techniki wojskowej i kosmicznej. Koszt tego rodzaju urządzeń był jednak bardzo wysoki. Pierwsze informacje na ten temat pojawiły się w kraju w 1999 r. [2].

Omawiana metoda stanowi nowy sposób obróbki materiałów, mający szansę szerokiego zastosowania w różnych dziedzinach techniki. Obecnie istnieje zapotrzebowanie na jej zastosowanie do wycinania z płytek krzemowych elementów diod i tyrystorów mocy, a także przy wykonywaniu elementów detektorów i sensorów półprzewodnikowych z materiałów kruchych (np. krzemu, germanu i arsenku galu) oraz innych elementów mikrosystemów. Celowe jest jednak poszukiwanie dalszych zastosowań w obszarach biologii, biotechnologii i medycyny (mikroingerencja laserowa).

W ramach prac badawczo-rozwojowych prowadzonych w Instytucie IPIB oraz w firmach Telesystem Mesko i firmie Solaris Optics SA, w latach 2000-2005 opracowano podstawy teoretyczne i przeprowadzono wstępne badania laboratoryjne dotyczące możliwości doprowadzania wiązki światła laserowego do obrabianego materiału

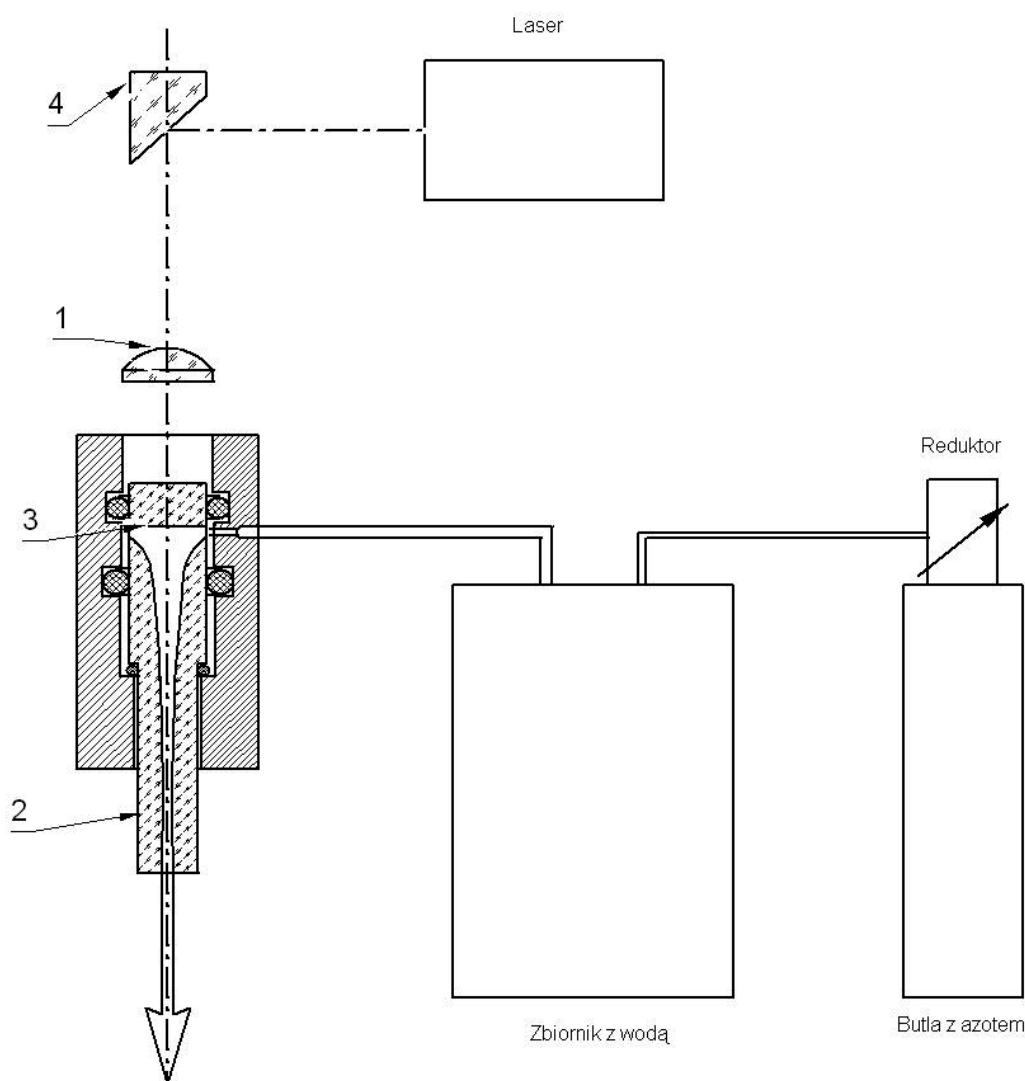
za pomocą cienkiego strumienia wody z wykorzystaniem zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia [3, 4].

Prace te były kontynuowane w latach 2012-2013 w Centralnym Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Aparatury Badawczej i Dydaktycznej COBRABiD sp. z o.o. [5]. Wykazano w nich realną możliwość opracowania w kraju, a w przyszłości wprowadzenia w polskim przemyśle, nowych technologii bazujących na mikroobróbce i mikroingerencji, czyli kontrolowanej głębokości wnikania promieniowania laserowego prowadzonego w otulinie cieczy. Dla przygotowania odpowiednich projektów wdrożeniowych niezbędne było rozwiązanie kilku problemów o charakterze podstawowym, a przede wszystkim posiadanie odpowiedniego stanowiska do przeprowadzania badań aplikacyjnych.

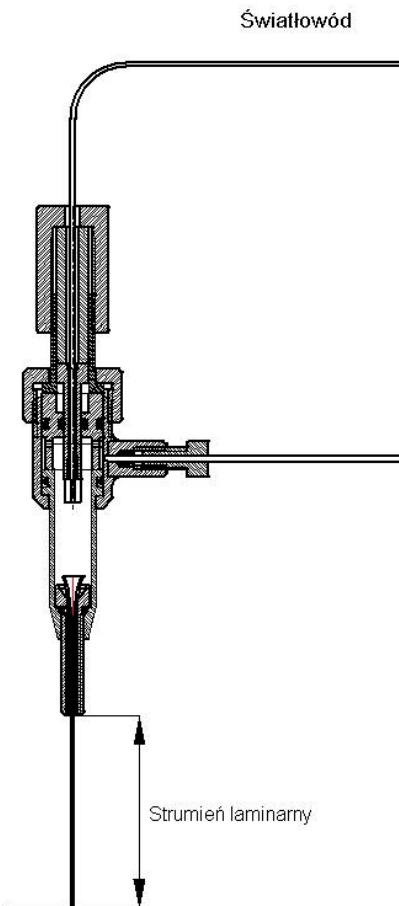
Przy pierwszych pracach konstrukcyjnych i przy doborze dysz do wytwarzania strumienia wody

posługiwano się układem modelowym przedstawionym na Rysunku 1.

W założeniach przyjęto opracowanie stanowiska bazującego na zastosowaniu diod laserowych i światłowodu, co umożliwiłoby mikroobróbkę promieniowaniem laserowym o różnych długościach fal w zakresie widzialnym i bliskim podczerwieni, płynną regulację mocy oraz doprowadzenie promieniowania światłowodem. Pozwoliłoby to na eliminację złożonego układu optycznego i znaczne uproszczenie urządzenia. Schemat takiego układu przedstawiono na Rysunku 2. Przyjęto maksymalną moc diod 2 W oraz zastosowanie bezpompowego podawania cieczy (wody) metodą ciśnieniową. Układ zasilania cieczą składa się ze źródła ciśnienia wytwarzanego ze standardowej butli ze sprężonym azotem, reduktora z manometrami kontrolnymi, przewodów ciśnieniowych, oraz ze zbiornika ciśnieniowego z manometrem do kontroli ciśnienia wyjściowego.

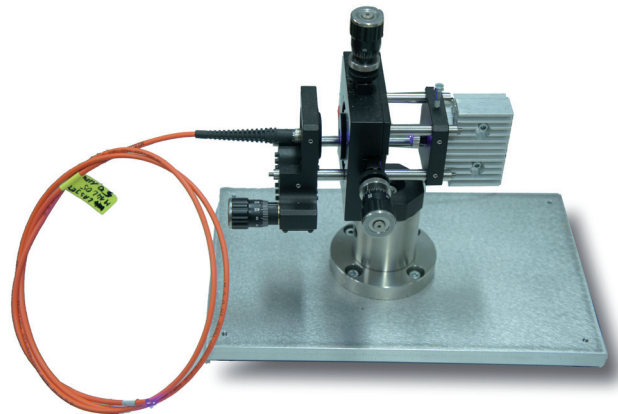


**Rysunek 1** Schemat zasilania wodą układu modelowego z elementami optycznymi: 1 – soczewka płasko-wypukła, 2 – dysza szklana lub stalowa, 3 – cylinder szklany (korek), 4 - pryzmat

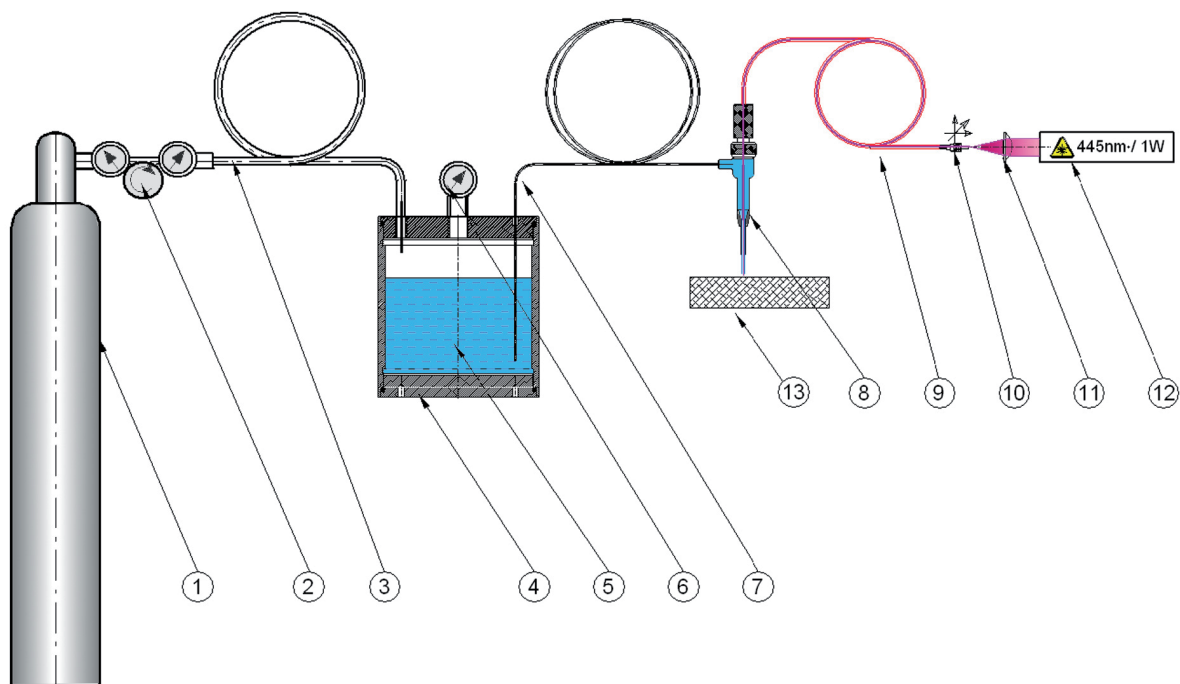


**Rysunek 2** Schemat układu wprowadzania wiązki laserowej z wykorzystaniem światłowodu. Schemat ogólny stanowiska badawczego przedstawiony jest na Rysunku 3

Sprężony azot jest podawany do zbiornika cieczy nad jej powierzchnią. Ciecz ze zbiornika jest wypychana pod ciśnieniem rzędu kilkudziesięciu MPa i dostarczana przez zawór odcinający do głowicy sprzęgającej laser ze strumieniem cieczy. Zespół wprowadzania wiązki laserowej do światłowodu jest przedstawiony na Rysunku 4. Zbiornik ciśnieniowy z cieczą roboczą (wodą) wraz z zaworami i manometrem jest przedstawiony na Rysunku 5.



**Rysunek 4** Zespół wprowadzania wiązki laserowej do światłowodu



**Rysunek 3** Schemat ogólny stanowiska badawczego stosowanego w dalszych pracach nad mikroobróbką i mikroingerencją. Opis oznaczeń: 1 – Butla z azotem; 2 – Zawór z manometrami; 3 – Przewód ciśnieniowy; 4 – Zbiornik ciśnieniowy; 5 – Ciecz (woda); 6 – Manometr; 7 – Kapilara doprowadzająca; 8 – Głowica; 9 – Światłowód; 10 – Manipulator XYZ; 11 – Układ optyczny sprzęgający wiązkę laserową ze światłowodem.; 12 – Laser (445 nm, 1 W)

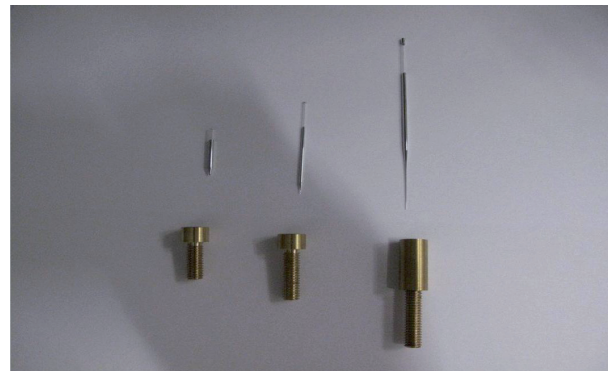


**Rysunek 5** Zdjęcie zbiornika ciśnieniowego z cieczą roboczą (wodą) wraz z zaworami i manometrem

#### 4. DYSZE ROBOCZE

W celu wprowadzenia wiązki laserowej do strumienia wodnego, który spełniałby rolę światłowodu dla tej wiązki, potrzebna jest dysza w postaci kapilary. Powinna to być dysza umożliwiająca wprowadzenie z jednej strony strumienia wodnego oraz światłowodu dostarczającego promieniowanie laserowe, z drugiej zaś strony musi tworzyć kapilarę formującą wyjściowy, laminarny strumień wodny o małej średnicy (ok. 0,1 mm). Musi to być zatem dysza o zmiennym przekroju poprzecznym i o kształcie konoidalnym tzw. butelkowym. Zmniejszaniu się przekroju poprzecznego w dyszy, towarzyszy spadek ciśnienia cieczy przy jednoczesnym wzroście jej prędkości. Parametry ciśnienia i średnicy wyjściowej kapilary dobierano tak, aby uzyskać możliwie długi odcinek strumienia wodnego bez zaburzeń turbulencyjnych.

W konstrukcji urządzenia przyjęto, że końcówka głowicy zawierająca dyszę z kapilarą roboczą jest wymienna i zawiera wymienny uchwyt kapilary. Zdjęcia tych elementów pokazano na Rysunku 6. W opracowanej konstrukcji stosowano dysze wykonywane początkowo z cienkościennych rurek ze szkła kwarcowego, a później ze szkła borokrzemowego. Stosowano również gotowe kapilary, wykorzystywane w badaniach biologicznych.

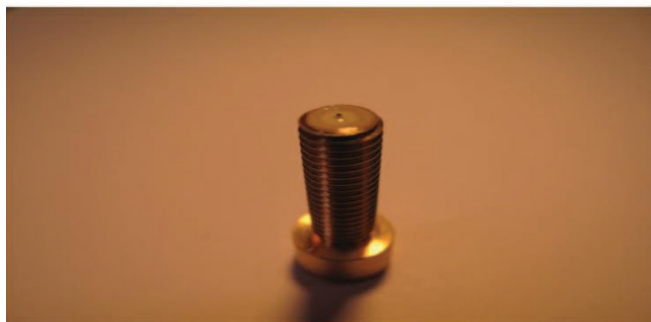
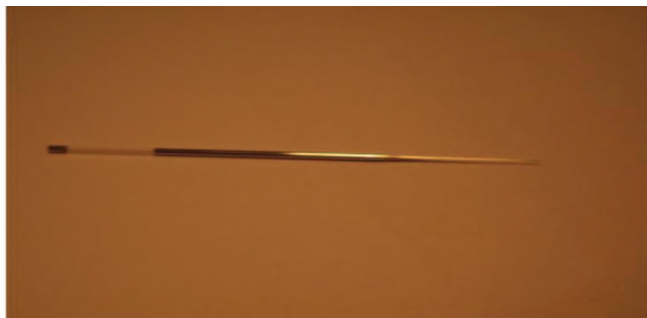


**Rysunek 6** Dysze i uchwyty kapilary

Promieniowanie laserowe wychodzące ze światłowodu powinno być wprowadzane do strumienia wodnego z możliwie dużą sprawnością. W tym celu powierzchnię zewnętrzną dyszy pokrywano początkowo warstwą srebra, a później warstwą aluminium, nanoszonymi metodą naporowania próżniowego.

Drugim czynnikiem wpływającym na sprawność, z jaką wiązka laserowa wprowadzana jest do strumienia wodnego, jest grubość ścianki odcinka wyjściowego dyszy. Grubość ta przy zadanym otworze wyjściowym kapilary powinna być jak najmniejsza. Dla wykonywanych kapilar o otworach wyjściowych w zakresie 100 – 300 mikrometrów uzyskiwana grubość ścianki wynosiła kilkadziesiąt mikrometrów.

Zdjęcia dysz i kapilar stosowanych do formowania laminarnego strumienia wodnego i wprowadzania wiązki laserowej przedstawione są na Rysunku 7. Dysze wklejane były w uchwyty i w trakcie klejenia centrowane.



**Rysunek 7** Zdjęcia dysz i kapilar stosowanych do formowania laminarnego strumienia wodnego i wprowadzania wiązki laserowej

## 5. WYTWARZANIE I BADANIE GŁOWIC

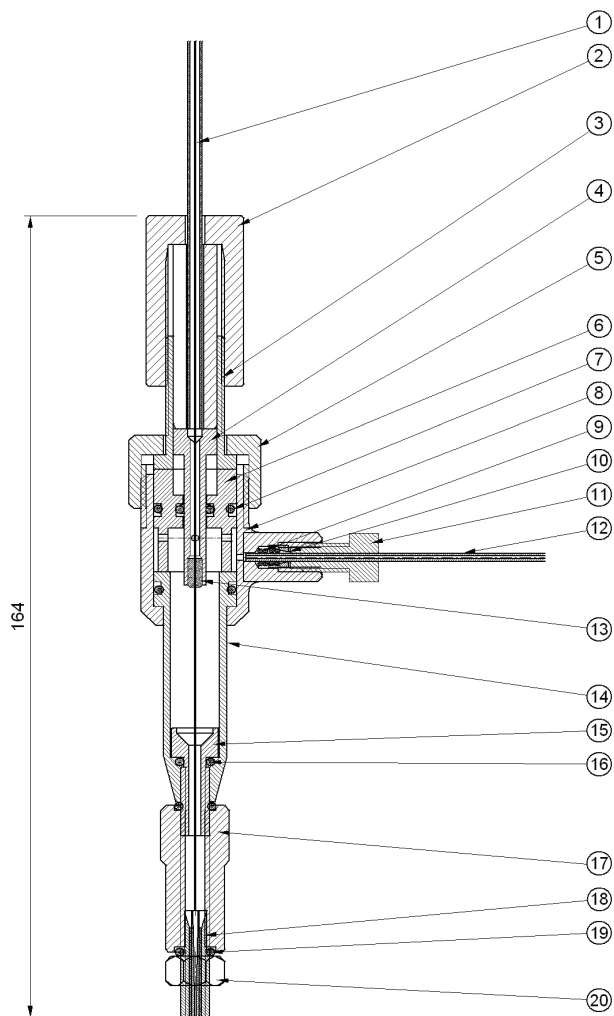
Obecnie w technologii cięcia materiałów powszechnie stosuje się zarówno cięcie wiązką laserową, jak i cięcie strumieniem wodnym (wodno-ściernym). W tym celu stosuje się lasery o mocy równej lub większej od 50 W. Długość fali stosowanego promieniowania laserowego mieści się w obszarze dalekiej podczerwieni (od 250 do 1000 nm), przy wykorzystaniu dysz uformowanych w syntetycznym diamencie. W dostępnej literaturze nie ma danych o sposobie wykonania tego typu dysz. Wprowadzenie wiązki laserowej do strumienia cieczy tworzącego światłowód, w obszarze promieniowania widzialnego pozwoli na szereg interesujących zastosowań praktycznych. Kluczowym problemem w realizacji tego zadania jest skonstruowanie takiej głowicy, która pozwoliłaby na wytworzenie laminarnego strumienia wodnego o małej średnicy (rzędu 0,1 mm) i wprowadzenie do niego wiązki laserowej. Długość laminarnego strumienia wodnego zależna jest od rodzaju zastosowań. Wydaje się, że nie powinna być mniejsza od kilku centymetrów.

Badania nad uzyskaniem propagacji wiązki laserowej w laminarnym strumieniu wodnym pierwotnie prowadzono w układzie przedstawionym na Rysunku 1. Laminarny strumień wodny o średnicy ok. 0,1 mm otrzymywano stosując kapilarę szklaną pokrytą glinem. Wiązka laserowa była

kierowana do kapilary za pomocą zwierciadła i ogniskowana na wejściu do kapilary za pomocą soczewki. Głowica była zamknięta okienkiem ze szkła borowo-krzemowego (BK 7) pokrytego warstwą antyrefleksyjną.

Układ zawierał kilka elementów optycznych, które wymagały częstej regulacji w trakcie prowadzonych badań. Rozwiązanie takie powodowało dużą wrażliwość układu na rozjustowanie. W celu wyeliminowania tych niedogodności, w miejsce elementów optycznych kierujących i ogniskujących wiązkę laserową, do jej doprowadzenia do głowicy zastosowano światłowód. Opracowano w tym celu konstrukcję głowicy przedstawioną schematycznie na Rysunku 8. Na Rysunku 9 pokazano przekrój i wprowadzanie wiązki laserowej, a na Rysunku 10 widok ogólny stanowiska badawczego. W górnej części głowicy znajdują się elementy mocujące i uszczelniające światłowód, a w dolnej części wymienna końcówka zawierająca wkład z kapilarą wykonaną ze szkła (dyszą). Konstrukcja taka pozwalała na łatwą wymianę dysz, co umożliwiała realizację zróżnicowanych badań.

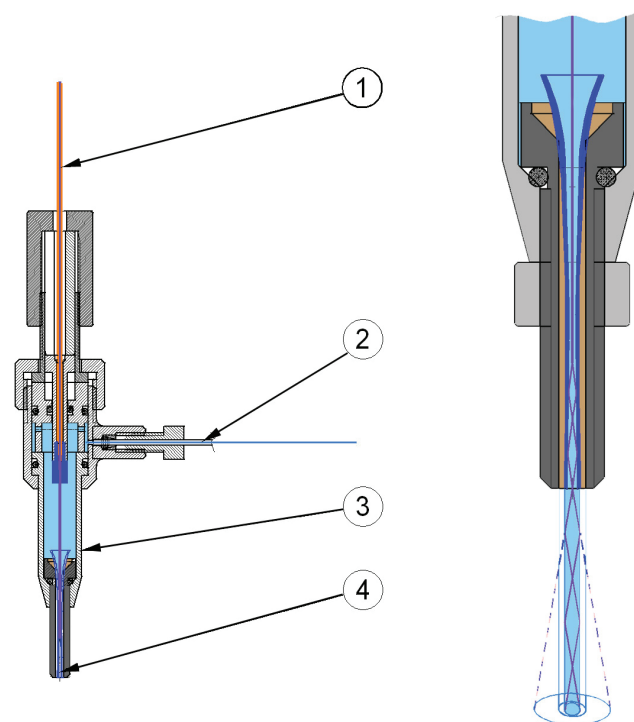
Na powierzchni zewnętrznej kapilar przedstawionych na Rysunku 7 naporowywano próżniowo warstwy glinu albo srebra. Kapilary wykonywane były ręcznie, średnice wewnętrzne na ich końcu (przy wylocie) wynosiły od 0,08 mm do 0,25 mm.



**Rysunek 8** Głowica robocza.

- 1 – Światłowód wielomodowy M14L o średnicy rdzenia 50 mikrometrów i średnicy płaszczka 125 mikrometrów;  
 2 – Tuleja regulacyjna; 3 – Tuleja prowadząca;  
 4 – Rurka przepustowa; 5 – Pierścień zamykający;  
 6 – Tulejka dystansowa komory wprowadzania cieczy;  
 7 – O-ring 14x1,8; 8 – Komora wprowadzania cieczy;  
 9 – O-ring 1,5x1,1; 10 – Stożek dociskowy;  
 11 – Przepust kapilary; 12 – Kapilara stalowa  $\varnothing 1,5$  mm;  
 13 – Silikonowa uszczelka światłowodu;  
 14 – Komora pośrednia;  
 15 – Gniazdo wyjściowe z gwintem M6; 16 – O-ring 4,5x1,8;  
 17 – Gniazdo końcówek z kapilarami;  
 18 – Kapilara wymienna w korpusie M6;  
 19 – O-ring 4,5x1,8; 20 – Nakrętka M6

W badaniach głowicy z kapilarami o średnicach wyjściowych 0,1-0,2 mm uzyskiwano strumień laminarny o długości do 60 mm, co w większości zastosowań jest wystarczające. Sprawność energetyczną układu, która wynosiła 50%, również można określić, jako wystarczającą. Parametry te powinny być jednak przedmiotem dalszych badań i optymalizacji.



**Rysunek 9** Schemat głowicy roboczej i zasada wprowadzania wiązki laserowej do strumienia wodnego za pomocą światłowodu.

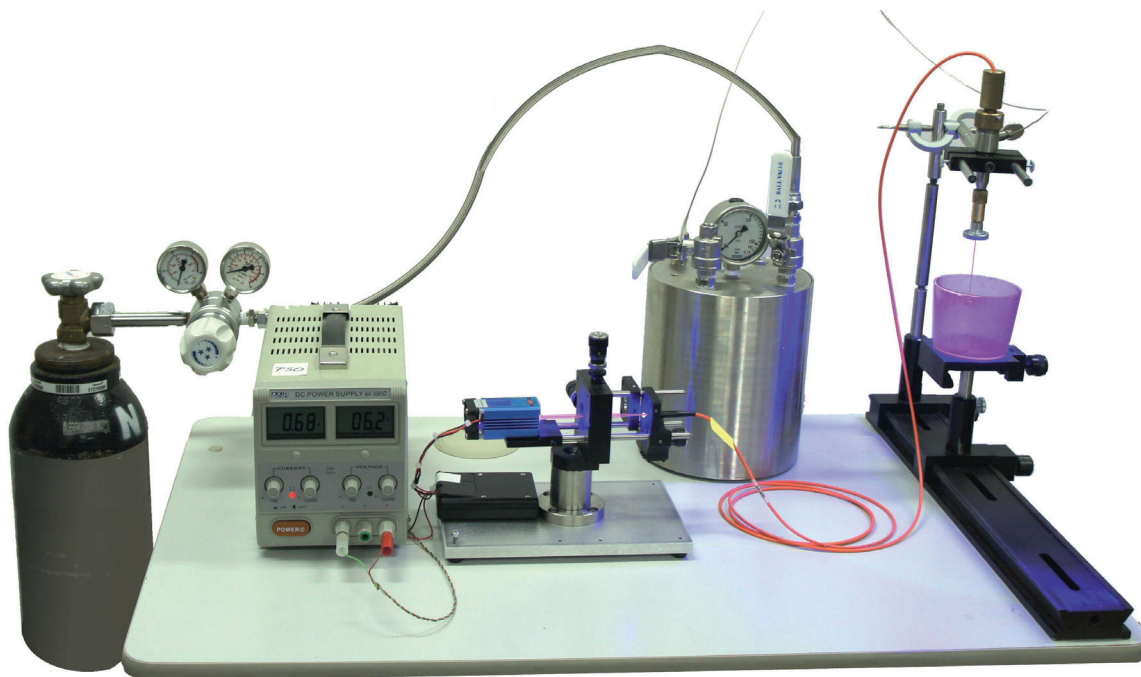
- 1 – Światłowód (średnica rdzenia 50 mikrometrów, średnica płaszczka 125 mikrometrów);  
 2 – Kapilara doprowadzająca wodę;  
 3 – Komora głowicy roboczej;  
 4 – Kapilara wyjściowa

## 6. STANOWISKO BADAWCZE

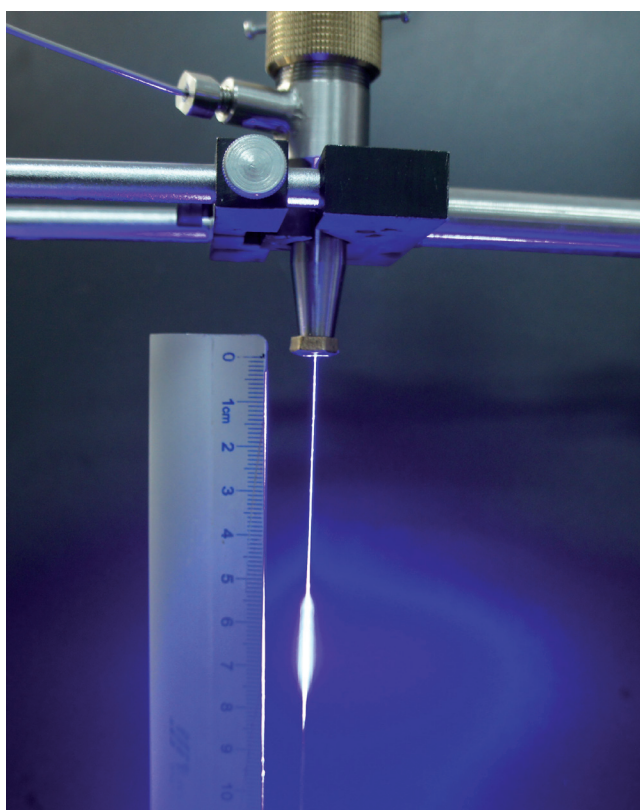
Układ jest zasilany napięciem 230 V przez urządzenia zabezpieczające przed przepięciami typu UPS. Jako ciecz stosowano wodę, ale może też być stosowana inna ciecz, której współczynnik załamania umożliwi powstanie światłowodu. Obsługa urządzenia powinna pracować w okularach ochronnych.

Najważniejsze rezultaty: uzyskano promieniowanie laserowe w otulinie wodnej na długości ok. 6 cm. Sprawność mocy urządzenia (stosunek mocy generowanej do mocy wydzielonej) oceniono na 50%. Zdjęcie wiązki promieniowania laserowego w laminarnym strumieniu wody o długości 53 mm przedstawiono na Rysunku 11.

Za pomocą strumienia uzyskano możliwość przepalenia (przebicia) warstwy folii poliuretanowej o grubości 1 mm w czasie 30 sekund, drzewnej – forniru bukowego w czasie 30 sekund, tkanki mięsnej (ciemno-czerwonej) w czasie 20-50 sekund, tłuszczu 30 sekund.



Rysunek 10 Widok ogólny stanowiska badawczego



Rysunek 11 Laminarna struga o długości ok. 53 mm

Cechy stanowiska i parametry:

- strumień wody jest dla wiązki promieniowania przezroczysty; promieniowanie nie powoduje ogrzewania ani parowania wody, dopiero zetknięcie z medium wywołuje temperaturę, zachodzi ingerencja termiczna i parowanie,
- strumień wody chłodzi obrabiany przedmiot przed nadmiernym nagraniem; odprowadzanie ciepła może być regulowane poprzez regulację szybkości parowania polegającą na zmianie mocy lasera,
- produkty erozji nie osadzają się na obrabianej powierzchni, ich szybkość usuwania można regulować poprzez zmianę ciśnienia strumienia cieczy,
- obróbka powierzchniowa materiałów i tkanek z zastosowaniem opracowanego stanowiska nie powoduje naprężeń cieplnych i zmian w strukturze obrabianego materiału.

## 7. WNIOSKI

Zaprezentowano istotne podzespoły urządzenia do obróbki materiałów i tkanek wiązką laserową w strumieniu wody, a mianowicie: dysze robocze i sposoby ich zasilania oraz głowice sprzęgające wiązkę promieniowania.

Stanowiskiem, rezultatami i możliwością przeprowadzania eksperymentów są zainteresowani badacze z zakresu inżynierii materiałowej powierzchni, medycyny, weterynarii, kosmetologii i biologii.



Wnioski na przyszłość: optymalizacja konstrukcji głowicy po uprzedniej optymalizacji – przeliczeniu biegu promieni, wyszukanie na rynku dyszy o takiej postaci, by było można ją po prostych czynnościach adaptować do różnych wymagań, skonstruowanie przegubowego manipulatora prowa-

dzenia głowicy, wyposażenie stanowiska w stół XYZ sterowany programem.

Prowadzone prace były przedmiotem seminariów w COBRABiD i na Politechnice Warszawskiej (Wydział Mechatroniki) oraz były prezentowane na konferencjach międzynarodowych [2, 3].

## LITERATURA

- [1] Richerzhagen B., Industrial application of the water jet-guided laser. The Industrial Laser User, SYNOVA, Parc scientifique Losanna Switzerland, issue 28 Sept. 2002.
- [2] Drozd Z., Szwach M., Mikroobróbka płytek krzemowych. Program Priorytetowy Nowe Technologie. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, zeszyt 3, 165-174, 2000.
- [3] Szukalski J., Strumień wodny światłowodem. Próby nad tzw. „zimnym laserem” VII Konferencja „Światłowody i ich zastosowania”. Białowieża 2002. Mat. Konf. 97-100.
- [4] Szukalski J., Micro-processing using a laser radiation passed through water optical wave guide (so-called “cold laser”). XIII Polish-Czech-Slovak Optical Conference “Wave and quantum aspects of contemporary optics” Krzyżowa 2003.
5. Szukalski J., Kalwas J. (COBRABiD), Wodnicki R. (SOLARIS-Optics), Mikrojety w aparaturze procesowej; aparatura do mikroingerencji w tkanki organiczne wiązką lasera w strumieniu wody. Opracowanie wewnętrzne COBRABiD, 2013, dostępne pod adresem zarząd@cobrabid.pl.