



Roman SZAFRAN

e-mail: roman.szafran@pwr.wroc.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny,
ul. Norwida 4/6, 50-373 Wrocław, tel. 71 320 38 13

Fabrykacja mikroaparatury metodą bezpośredniego grawerowania laserowego DLP

W pracy przedstawiono wyniki badań nad aplikacją metody bezpośredniego grawerowania laserowego do procesu grawerowania mikrostruktur układów LOC. Metoda ta umożliwia automatyzację i standaryzację etapów projektowania i wytwarzania prototypowych mikroaparatury, skracając czas ich projektowania i wytwarzania do kilkudziesięciu minut. Dla optymalnych parametrów pracy stacji grawerującej: moc 0,1%, szybkość przesuwu głowicy 0,4%, częstotliwość impulsów 1000 PPI oraz bocznego nadmuchu powietrza otrzymano prawidłowo odwzorowane, zaprojektowane struktury, których przydatność do budowy układów LOC zostanie potwierdzona w kolejnych badaniach.

Wstęp

Mikroaparatury (mikromieszalniki, mikroseparatory, mikroreaktory, mikro wymienniki ciepła itp.) są podstawowymi elementami systemów lab on a chip (LOC) – miniaturowych odpowiedników instalacji procesowych. Przejście ze skali makro do skali mikro i nano w projektowaniu procesów i aparatury, nie jest jednak stricte zagadnieniem z dziedziny powiększania skali, z racji odmiennych metod wytwarzania mikroaparatury oraz sposobów realizacji procesów jednostkowych w mikrosystemach.

Mikrochipy złożone są z sieci kanałów o średnicach od kilku do kilkuset mikronów (zwykle 10-300 μm). Mogą być wytwarzane z szerokiej gamy materiałów, między innymi krzemu, szkła, kwarcu, metali oraz różnego rodzaju tworzyw sztucznych poliestrowych PET, PMMA, PC, oraz PDMS z wykorzystaniem różnorodnych technik: fotolitografii (SU-8), anizotropowego wytrawiania (DRIE), miękkiej litografii, wytłaczania na gorąco, grawerowania proszkowego, formownia wtryskowego oraz grawerowania laserowego lub mechanicznego. Spośród wymienionych, najczęściej wykorzystywane są dwie pierwsze metody wywodzące się z technologii produkcji systemów mikroelektromechanicznych (MEMS) oraz litografia miękka.

Cały proces składa się z wielu etapów, w skład których wchodzi takie czynności jak: nakładanie rezystu, suszenie, naświetlanie i wywoływanie, wytrawianie i usuwanie rozpuszczonych warstw oraz końcowa obróbka i czyszczenie chipa. Czasami stosuje się też dodatkowe fotomaski, dzięki którym uzyskuje się lepszej jakości struktury. Metody litograficzne prowadzą do powstawania struktur wysokiej rozdzielczości i jakości, są jednak bardzo pracochłonne i wymagają zastosowania drogiego, specjalistycznego sprzętu. Czas fabrykacji mikrosystemu waha się od kilkudziesięciu godzin do kilku dni, a czas potrzebny na zaprojektowanie i wykonanie prototypowej struktury sięga nawet kilku tygodni.

Metoda bezpośredniego grawerowania laserowego mikrostruktur (DLP)

Alternatywą dla metod litograficznych stanowią metody bezpośrednie, wykorzystujące źródła promieniowania laserowego dużej mocy: CO₂ (długość fali 10.6 μm – bliska podczerwień) oraz Nd-YAG (kolejne składowe harmoniczne fali: 1064, 532, 326 i 266 nm – od bliskiej podczerwieni po ultrafiolet). W wyniku bezpośredniego oddziaływania plamki lasera z powierzchnią materiału następuje, w zależności od typu materiału oraz parametrów wiązki laserowej, (długość fali, czas trwania impulsu, częstotliwość repetycji itp.) spalanie, topienie, sublimacja, depolimeryzacja (PMMA), ablacja (w szczególności desorpcja), spienianie, zmiana koloru, wyżarzanie (metale). Klasyczna metoda grawerowania bezpośredniego wiązką lasera CO₂ stosowana jest już od kilku lat. Niestety ma ona poważne wady: niska jakość otrzymanej struktury - wysoka chropowatość powierzchni grawerowanej, silnie zależna od wykorzystanego materiału oraz minimalna średnica plamki na poziomie 100 μm , co znacznie ogranicza obszar zastosowania. Ulepszoną metodą bezpośredniego grawerowania laserem CO₂ „Laser Through-Cutting and Pattern Transfer” (TC&T) opracowali Liu H.B. i Gong H.Q. w 2009 roku. Wykorzystuje ona materiały kompozytowe PMMA/PDMS, jest dwuetapowa i pozbawiona wad pierwotnej metody. Dzięki zastosowaniu modułu HPDFO możliwe było uzyskanie kanału o minimalnej średnicy równej 30 μm , o gładkich powierzchniach dna i głębokościach od 17 do 3600 μm przy jednokrotnym przebiegu głowicy. Ściany kanału były chropowate i zanieczyszczone pyłem pochodzącym z rozpadu termicznego materiału, jednak efekt ten silnie zależał od parametrów wiązki. Drugim etapem procesu TC&T jest proste przeniesienie struktury PDMS na nowe podłoże. Całkowity czas potrzebny na fabrykację mikrochipu szacowany jest na około 30 min [Liu H.B., Gong H.Q., 2009].

Metoda bezpośredniego wytwarzania mikroaparatury procesowych i całych systemów procesowych na chipie umożliwia uproszczenie, automatyzację i standaryzację układów. Dzięki redukcji etapów wytwarzania struktury do trzech głównych: a) projektowania w środowisku CAD, b) bezpośredniego grawerowania laserowego w podłożu, c) łączenia poszczególnych elementów w funkcjonalny układ, możliwe jest skrócenie czasu fabrykacji prototypów, wprowadzania zmian, badań i optymalizacji nowych rozwiązań konstrukcyjnych.

Celem badań była praktyczna aplikacja metody DPL będąca modyfikacją metody zaproponowanej przez Liu H.B. i Gong'a H.Q. w 2009, do wytwarzania złożonych struktur geometrycznych mikrokanalów oraz wyznaczenie optymalnych parametrów pracy układu grawerującego, tak aby uzyskane struktury cechowały się wysoką dokładnością, gładkimi ścianami i brakiem zanieczyszczeń powierzchniowych.

Metodyka badań

Jako podstawowy materiał do badań, w którym grawerowane były mikrokanale, wykorzystano przygotowane w laboratorium materiały kompozytowe PDMS/folia poliestrowa (nośnik pierwotny). W ramach uprzednich badań laboratoryjnych określono, iż jest to najlepszy układ umożliwiający uzyskanie gładkich, jednorodnych warstw PDMS o kontrolowanej grubości, umożliwiający swobodne przenoszenie PDMS z warstwy nośnika pierwotnego na podłoża z PMMA lub szkła, będące materiałem konstrukcyjnym chipa.

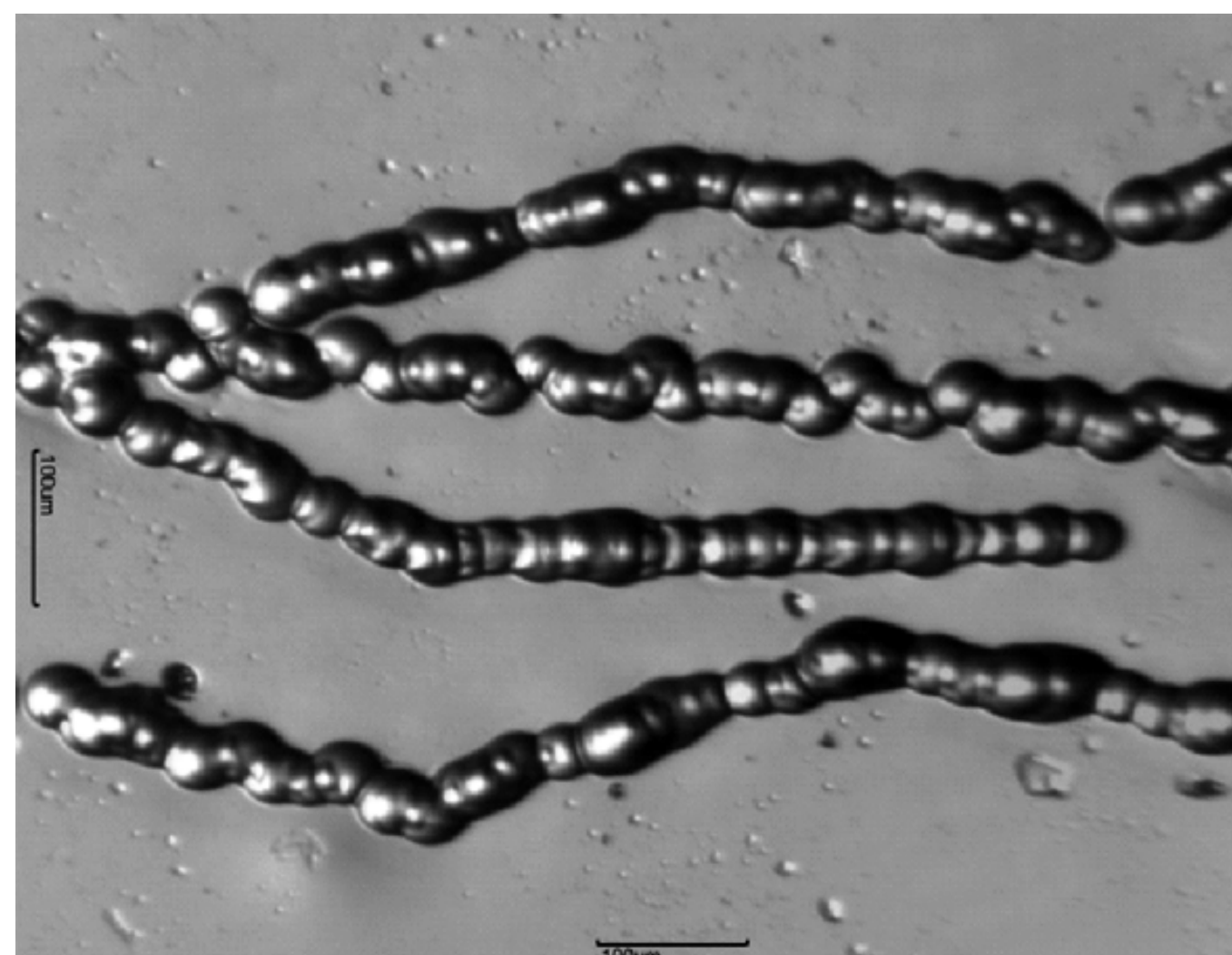
Na powierzchnię krawędzi folii poliestrowej (folia do drukarek laserowych) o średnicy 100 mm nanoszono cienkie warstwy PDMS Poli(dimetylosiloksan) Sylgrad 184 (Dow Corning, Silicone Elastomer Kit) metodą powlekania obrotowego. Przed powlekaniami przygotowywano PDMS poprzez zmieszanie składnika A (monomer) i B (katalizator polimeryzacji) w proporcjach wagowych 10:1, po czym z mieszaniny usuwano pod próżnią pęcherzyki powietrza.

Wykonane mikroukłady

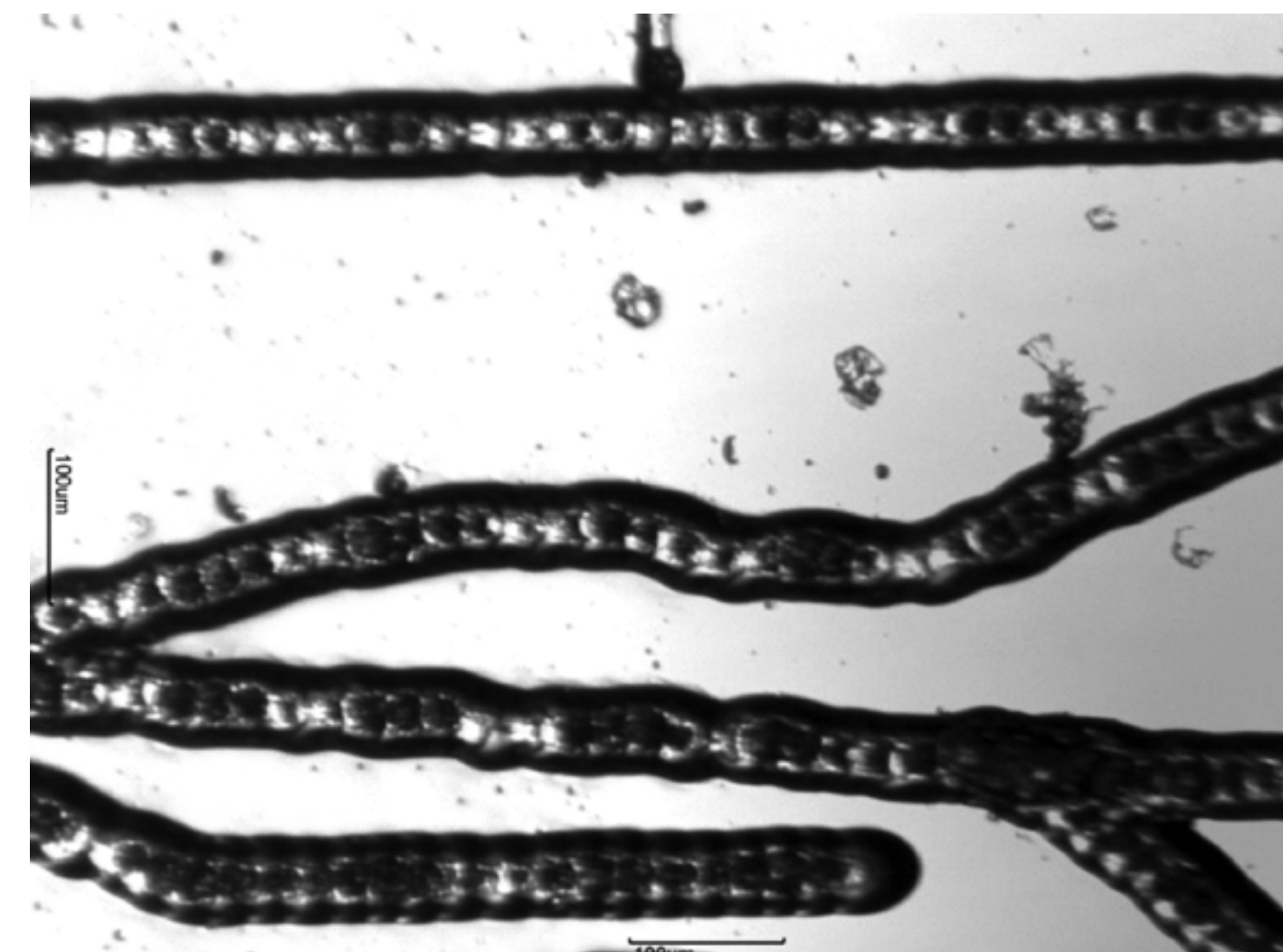
Tak przygotowaną i odpowietrzoną mieszaninę nanoszono na krawędzi folii w powlekanach obrotowych (Laurell Technologies WS-650-23 NPP) w ciągu 3 minut, przy prędkości obrotowej 700 obr./min. Folie następnie umieszczano w suszarce szafkowej w temp. 60°C na 2h w celu polimeryzacji PDMS. Do laserowego grawerowania mikrokanalów wykorzystano stację grawerującą CO₂ Universal Laser Systems, model VLS 2.30 o maksymalnej mocy 30W i maksymalnej prędkości przesuwu głowicy 0.254 m/s, wyposażoną w moduł optyczny HPDFO (średnica plamki 30 μm) oraz stół do cięcia, pracującą w trybie wektorowym. Zastosowanie modułu HPDFO umożliwiało uzyskanie kanałów o minimalnej średnicy 30 μm . Układ mikrokanalów projektowano z wykorzystaniem oprogramowania CAD Autodesk AutoCAD, a następnie eksportowano do środowiska pracy stacji grawerującej. Moc, intensywność nadmuchu, prędkość przesuwu głowicy oraz częstotliwość impulsu lasera były tak dobierane by zapewnić optymalną jakość uzyskanych struktur przy jednoczesnym przecięciu warstwy PDMS do powierzchni folii poliestrowej, jednak bez przecięcia nośnika. Dzięki temu możliwe było przenoszenie warstw PDMS na nowe podłoża wykorzystywane przy konstrukcji chipa przy pełnym zachowaniu geometrii wygrawerowanej struktury. Badania przeprowadzono w następujących zakresach parametrów pracy stacji grawerującej: moc 0,1 – 1 % mocy znamionowej (wyższe wartości powodowały przecięcie podłoża), prędkość przesuwu głowicy 0,1 – 2% zakresu, częstotliwość impulsu 1000 PPI. Jakość uzyskanych struktur oceniano z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego Motic K-400L, wyposażony w kamerę Moticam 2300.

Wyniki badań doświadczalnych

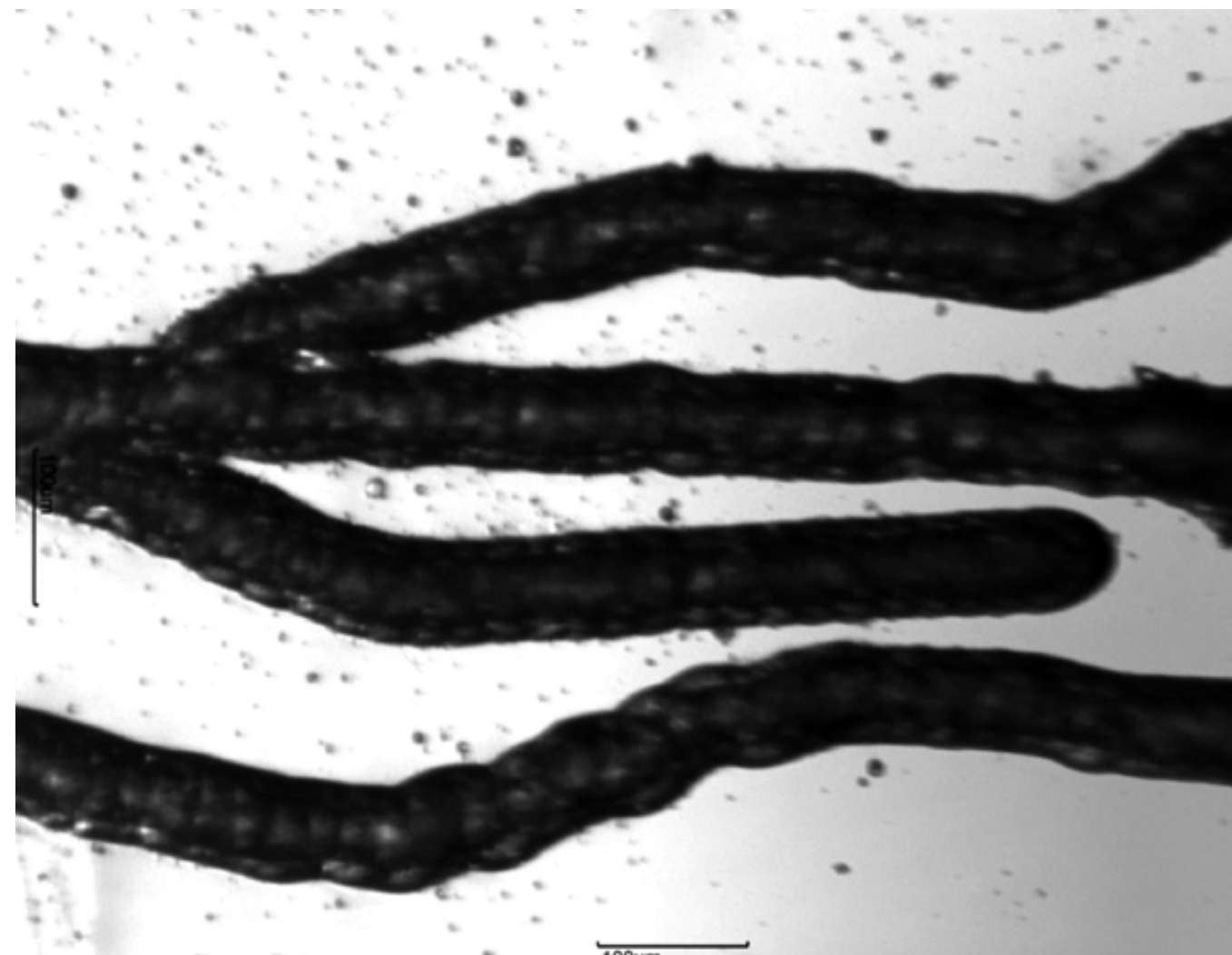
Na rysunkach 1- 3 przedstawiono przykładowe struktury kanałów uzyskane przy różnych ustawieniach parametrów pracy stacji grawerującej. Generalnie, wraz ze wzrostem prędkości przesuwu lasera spadała dokładność odwzorowania grawerowanej struktury, przy prędkościach powyżej 2% zdarzały się miejsca w których fragmenty kanałów nie tworzyły ciągłej struktury. Podobna sytuacja występowała gdy dobrano zbyt niską moc wiązki lasera i zbyt dużą prędkość przesuwu głowicy, co zobrazowano na rysunku 1.



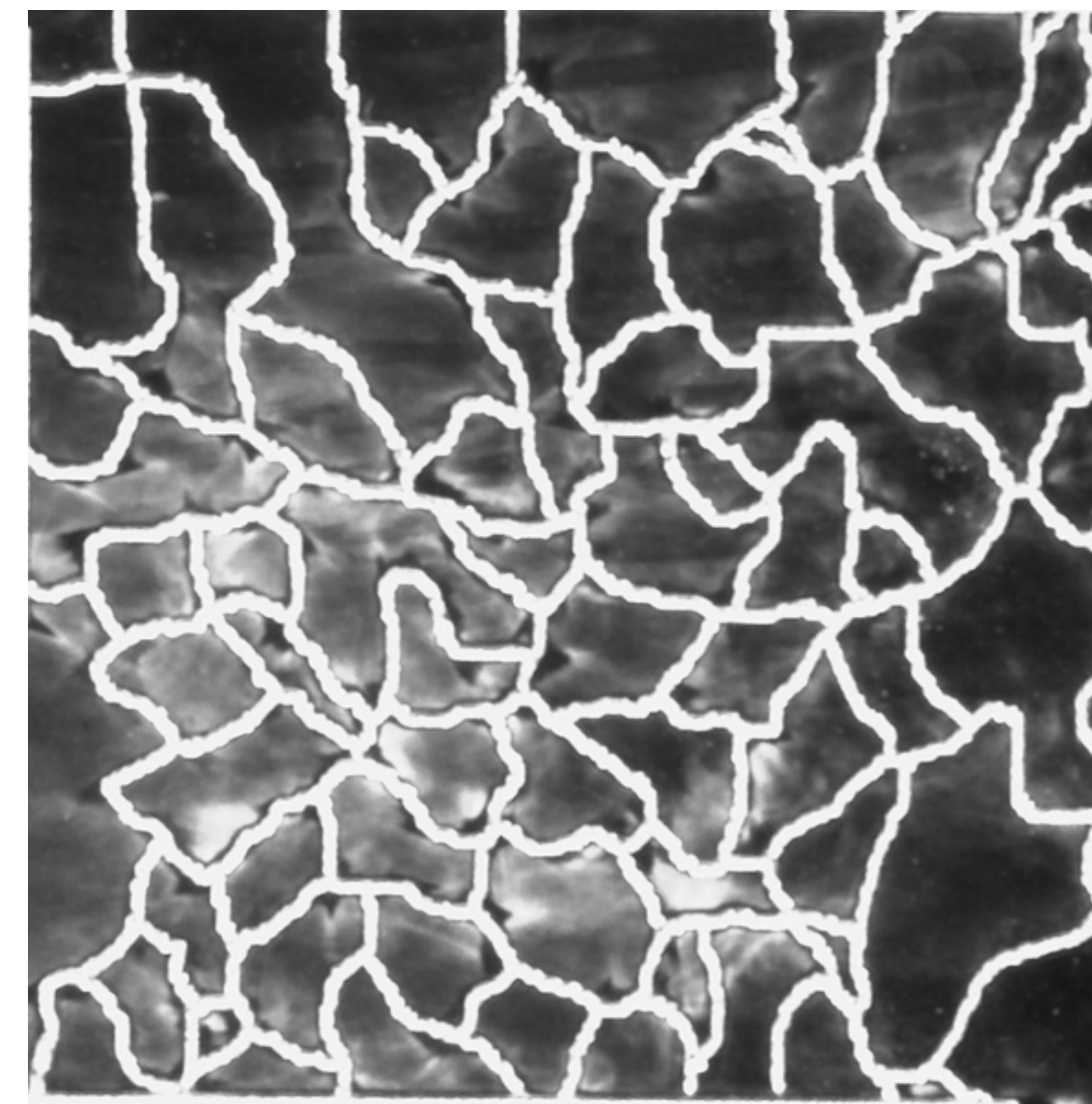
Rys. 1. Stuktura mikrokanalów, materiał PDMS o grubości 100 μm , parametry pracy stacji grawerującej: moc 0,2%, prędkość 1,3%. Kanały niejednorodne o nieznaczącej głębokości.



Rys. 2. Stuktura mikrokanalów, materiał PDMS o grubości 100 μm , parametry pracy stacji grawerującej: moc 0,1%, prędkość 0,5%. Kanały jednorodne o głębokości mniejszej niż grubość warstwy PDMS.



Rys. 3. Stuktura mikrokanalów, materiał PDMS o grubości 100 μm , parametry pracy stacji grawerującej: moc 0,1%, prędkość 0,4%. Kanały jednorodne o pełnej głębokości warstwy PDMS.



Rys. 4. Stuktura mikrokanalów. Jasnoszare zabrudzenie powierzchni PDMS wokół wygrawerowanych kanałów pyłami z termicznej degradacji polimeru.

Usunięcie zabrudzeń powierzchniowych możliwe było po trzykrotnym przemyciu struktury w izopropanolu w myjce ultradźwiękowej, każdorazowo przez okres 1 minuty.

LITERATURA

Liu H.B., Gong H.Q., 2009. Templateless prototyping of polydimethylsiloxane microfluidic structures using a pulsed CO₂ laser. *J. Micromech. Microeng.*, 19, 037002, 1-8. DOI: 10.1088/0960-1317/19/3/037002.

Szafran R., 2013. Metodyka projektowania mikroaparatury lab on a chip do badań przepływów w naczyńkach włosowatych guzów nowotworowych, *XXI Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej Szczecin/Kołobrzeg, 2-6 września 2013.*

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały sfinansowane w ramach grantu badawczego NCN N N501 042140.