

KAPILARY ELASTYCZNE DO ZASTOSOWAŃ MEDYCZNYCH I TECHNICZNYCH. ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYTWARZANIA

Dariusz Pysz, Longin Kociszewski, Ryszard Stępień

Przedstawiono wyniki wytwarzania (według opracowanej w ITME metody) grubościennych rur szklanych - preform (o proporcjach ϕ_w/ϕ_z od 0.9 do 0.01) i wyciągania z nich kapilar elastycznych. Wyciągnięto kilka rodzajów kapilar (o proporcjach ϕ_w/ϕ_z od 0.72 do 0.13) z przygotowanych preform ze szkła neutralnego. Określono parametry procesów technologicznych i parametry geometryczne kapilar, które są podstawą do wytwarzania kapilar elastycznych z materiału docelowego, którym jest szkło krzemionkowe. Wytworzone ze szkła krzemionkowego kapilary o średnicy (600 do 950 μm) charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, stanowią wstęp do opracowania elastycznych torów do przesyłania promieniowania laserów CO_2 ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) i Er:YAG ($\lambda = 2,94 \mu\text{m}$).

1. WSTĘP

Wśród produktów wytwarzanych przez firmy zajmujące się włóknami światłowodowymi, istotne miejsce zajmują różnego rodzaju precyzyjne kapilary szklane. Wytwarzanie ich umożliwiają urządzenia technologiczne stosowane do produkcji światłowodów. Szczególnie interesującym produktem o szerokim zastosowaniu są kapilary elastyczne. Dużą wytrzymałość i elastyczność zawdzięczają stosowanym zewnętrznym pokryciom polimerowym (podobne jak w przypadku światłowodów - Rys. 1 [1]) nakładanym w trakcie procesu wyciągania. Możliwe jest wytwarzanie takich kapilar w bardzo szerokim zakresie wymiarów (średnica wewnętrzna od 2 do 2500 μm) o bardzo dużych długościach (dzięki elastyczności i możliwości nawijania na bęben), nawet do 1000 metrów [1-2].



Rys.1. Struktura kapilary elastycznej.

Fig.1. Structure of flexible capillary.

Kapilary elastyczne znalazły bardzo wiele zastosowań praktycznych [1-6], jako:

- kolumny chromatograficzne - chromatografów gazowych i ciekowych, stosowane do rozdzielania i określania zawartości związków chemicznych; stosowane do celów analitycznych w laboratoriach, przemyśle chemicznym, petrochemicznym, farmaceutycznym, medycznym, gdzie stosowane są kapilary o różnych średnicach (od kilku do kilkuset μm) i różnych długościach - nawet ponad 100 m. Wymiary kapilar uzależnione są od rodzajów przeprowadzanych analiz (stopnia złożoności badanych mieszanin związków), wymaganą czułością kolumny i prędkością przeprowadzania pomiarów,

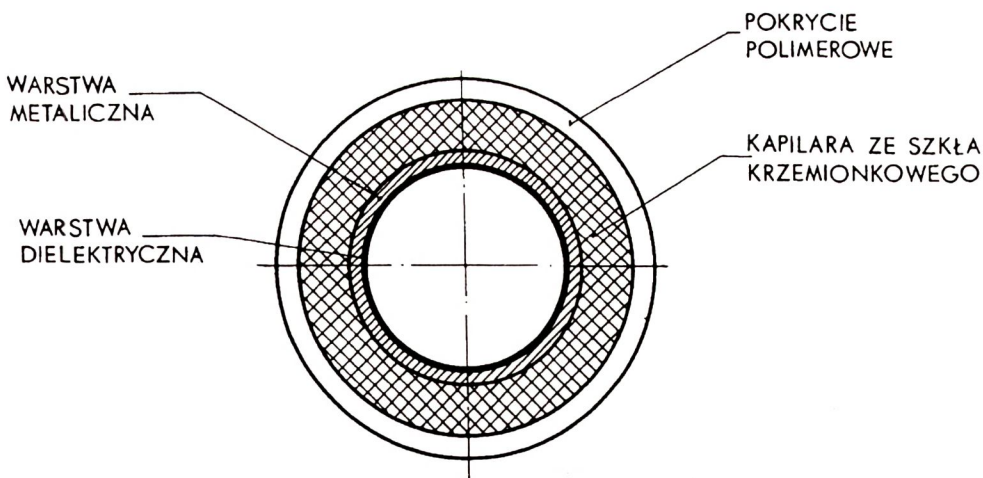
- elektroforeza kapilarna - rozdzielanie roztworów koloidalnych pod wpływem pola elektrycznego, analiza białek,

- do precyzyjnego łączenia włókien optycznych i elementów optoelektronicznych (możliwość centrowania) i zabezpieczania przed uszkodzeniem, a także precyzyjnej obróbki włókien jednomodowych (kapilary o małych średnicach wewnętrznych),

- w miniaturowych układach hydraulicznych, sterujących, dozujących i podających ciecze i gazy,

- jako elastyczne falowody do przesyłania promieniowania laserowego w zakresie podczerwieni (lasery CO_2 ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) i Er:YAG ($\lambda = 2,94 \mu\text{m}$)). Przekrój takiego falowodu kapilarnego przedstawiony jest na Rys.2 [5].

W pracy przedstawiono wyniki prób wytwarzania grubościennych preform szklanych, a następnie wyciągania z nich kapilar elastycznych. Omówiono właściwości geometryczne i mechaniczne uzyskanych kapilar w porównaniu z kapilarami wytwarzanymi komercyjnie oraz wskazano potencjalne możliwości ich wykorzystania.



Rys.2. Przekrój falowodu do przesyłania promieniowania podczerwonego.

Fig.2. Cross-section of the waveguide for i.r. radiation delivery.

2. PRACE BADAWCZO-TECHNOLOGICZNE

2.1. MATERIAŁY

Podstawowym materiałem do wytwarzania kapilar elastycznych jest szkło krzemionkowe. W Tabeli 1 przedstawiono podstawowe właściwości szkła krzemionkowego. Pozwala ono na osiągnięcie najlepszych właściwości mechanicznych : elastyczności, wytrzymałości na zerwanie, odporności na ciśnienie.

Tabela 1. Właściwości szkła krzemionkowego (topiony kwarc).

Table 1. Properties of silica glass (fused silica).

WŁAŚCIWOŚCI	WARTOŚĆ
Współczynnik załamania światła n_D	1,458
Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej dla zakresu : $20 \div 300^\circ\text{C}$ [10^{-7}K^{-1}]	5,0
Temperatura transformacji T_g [$^\circ\text{C}$]	1000
Temperatura mięknięcia [$^\circ\text{C}$]	1590
Wytrzymałość na zerwanie [N/mm^2]	50000

Preformę stanowi precyzyjnie wykonana rura, o odpowiednim stosunku średnic zewnętrznej i wewnętrznej. Niezwykle istotna jest wysoka jakość szkła krzemionkowego przeznaczonego na kapilary, a szczególnie ważne jest nie występowanie pęcherzy powietrza, niejednorodności w masie szklanej. Tego typu wady poważnie osłabiają wytrzymałość kapilary i powodują jej pękanie przy zginaniu. Wytwarzanie wysokiej jakości rur ze szkła krzemionkowego jest skomplikowanym technologicznie procesem, opanowanym tylko przez najlepsze firmy światowe (np. HERAEUS). Rury wytwarzane w kraju nie mogą być stosowane, z uwagi na wymienione wcześniej wady. Z powodu wysokiej ceny i trudności technologicznych w przetwarzaniu szkła krzemionkowego na kapilary (temp. pocieniania $\sim 2000^{\circ}\text{C}$, konieczność stosowania atmosfery ochronnej pieca), w większości przeprowadzanych prac badawczych wykorzystano szkło neutralne. Jest to materiał tani, łatwo dostępny i odznaczający się stosunkowo dobrymi właściwościami mechanicznymi. Przetwarzanie szkła na kapilary możliwe jest przy zastosowaniu typowego pieca oporowego (temp. od 800 do 900°C), co znacznie upraszcza proces technologiczny i umożliwia przeprowadzanie całego szeregu eksperymentów w zakresie wytwarzania preform i wyciągania kapilar. Oczywiście szkła neutralnego nie należy traktować jako materiału docelowego.

W Tabeli 2 przedstawiono podstawowe właściwości szkła neutralnego. Na rynku występują kapilary elastyczne wytworzone ze szkła boro-krzemianowych (zbliżone do neutralnego), ale ich właściwości mechaniczne są wyraźnie gorsze od kapilar ze szkła krzemionkowego [4].

Tabela 2. Właściwości szkła neutralnego (SNK) produkcji Krośnieńskich Hut Szkła.

Table 2. Properties normal glass (SNK) manufactured by Glass-Works of Krosno.

WŁAŚCIWOŚĆ	WARTOŚĆ
Współczynnik załamania światła n_D	1,503
Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej dla zakresu:	
$20 \div 300^{\circ}\text{C}$ [10^{-7}K^{-1}]	60,1
$20 \div 450^{\circ}\text{C}$ [10^{-7}K^{-1}]	60,2
Temperatura transformacji T_g [$^{\circ}\text{C}$]	569
Dylatometryczna temperatura mięknięcia DTM [$^{\circ}\text{C}$]	642
Temperatury charakterystyczne w mikroskopie grzewczym Leitz'a:	
Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	
- zaoblenia się próbki	695
- przybrania kształtu kuli	870
- przybrania kształtu półkuli	1040

Przy wytwarzaniu kapilar elastycznych, niezbędnym elementem procesu jest pokrycie kapilary warstwą polimeru tworzącego powłokę ochronną, nadającego elastyczność, wytrzymałość, przed mikropęknięciami i uszkodzeniami mechanicznymi. Właściwymi materiałami są tutaj materiały o dużej elastyczności stosowane na zewnętrzne pokrycia światłowodów. Zostały wybrane dwa rodzaje lakieru akrylowego firmy De Soto: 950 x 101 i 950 x 44, nakładanego na kapilary poprzez przeciąganie ich przez odpowiednią dyszę i utwardzanie promieniowaniem UV. Właściwości lakierów są zbliżone (Tabela 3).

Możliwe jest nałożenie dwóch warstw pokryć - dodatkowe wewnętrzne miękkie pokrycie, powinno korzystnie wpłynąć na elastyczność, ale w przypadku tym całkowita grubość pokrycia znacznie się zwiększa (co najmniej 2x), w związku z czym zrezygnowano z tego. Do nakładania lakieru niezbędne jest zastosowanie dyszy o odpowiednim otworze, wyznaczającym zewnętrzną średnicę kapilary. W prowadzonych pracach zostały zastosowane dysze o średnicach od 360 do 1100 μm , stosowane przy wytwarzaniu światłowodów.

Tabela 3. Właściwości lakierów na pokrycia zewnętrzne.

Table 3. Properties of coating materials.

WŁAŚCIWOŚCI	950x101	950x044
Lepkość (25°C) [mPa]	5500	5000
Twardość [Shore D]	70	60÷55
Wytrzymałość na zerwanie [N/mm ²]	35,3	24,7
Współczynnik załamania światła n_D	1,54	1,53

2.2. PRZYGOTOWANIE PREFORM

Istnieje potrzeba wytwarzania kapilar w bardzo szerokim zakresie wymiarów (średnicy wewnętrznej i zewnętrznej i ich stosunku). W Tabeli 4 przedstawione są parametry (średnica wewnętrzna i zewnętrzna bez pokrycia) niektórych typowo wytwarzanych kapilar elastycznych [1-2].

Tabela 4. Przykłady parametrów geometrycznych niektórych typowo wytwarzanych kapilar [1-2].

Table 4. Examples of geometric parameters some of typically manufactured capillaries [1-2].

Średnica wewnętrzna (ϕ_w) [μm]	Średnica zewnętrzna bez pokrycia (ϕ_z) [μm]	ϕ_w/ϕ_z
5	118	0.04
5	323	0.015
30	323	0.09
50	323	0.15
75	323	0.23
100	323	0.30
150	323	0.46
180	300	0.60
250	320	0.78
320	395	0.81
530	652	0.81
700	802	0.87

Wytwarzanie kapilar o odpowiednim stosunku średnicy wewnętrznej do zewnętrznej wymaga przygotowania preformy $\sim 10\%$ większej niż zakładana (wniosek z przeprowadzonych prób technologicznych) proporcji. Z uwagi na niedostępność rur neutralnych o dużej grubości ścianek (najmniejsza $\phi_w/\phi_z = 0.67$) opracowano metodę wytwarzania preform poprzez składanie i kolejne pocienienie średnicy rur. Grubościenną rurę oznaczoną symbolem (TPO-1) o następujących parametrach: $\phi_w = 11.7$; $\phi_z = 17.4$; $\phi_w/\phi_z = 0.67$, pocieniono na rurę oznaczoną (TP1) $\phi_w = 6.5$; $\phi_z = 10.2$; $\phi_w/\phi_z = 0.64$. Rura ta została umieszczona w rurze (TPO-1). Cały zestaw po pocienieniu dał preformę (TP2) o $\phi_w = 4$; $\phi_z = 10.4$; $\phi_w/\phi_z = 0.38$. Kolejne powtarzanie takiego procesu, jak też dobór rur o różnych grubościach ścianek, pozwalają na wytworzenie preformy o praktycznie dowolnym stosunku średnicy ϕ_w/ϕ_z . Parametry wytworzonych i stosowanych preform są przedstawione w Tabeli 5.

Proces wytwarzania preform wymaga precyzyjnego dobrania, metodą kolejnych prób technologicznych, takich parametrów jak temperatura, prędkość podawania, prędkość wyciągania oraz przystosowania wyciągarki do wyciągania rur o dużych średnicach (>10 mm). W Tabeli 6 przedstawiono parametry procesu wytwarzania preform.

Tabela 5. Preformy wykorzystane do wytwarzania kapilar elastycznych.

Table 5. Preforms used in the process of flexible capillaries manufacturing.

Oznaczenie preformy	Średnica wewnętrzna (ϕ_w) [mm]	Średnica zewnętrzna (ϕ_z) [mm]	ϕ_w / ϕ_z
TP0-1	11,7	17,4	0,67
TP0-2	16,0	21,2	0,75
TP1	6,5	10,8	0,64
TP2	4,0	10,5	0,38
TP3	2,6	10,6	0,25
TP4	1,65	10,8	0,15
K	15,0	18,2	0,82

Tabela 6. Parametry procesów wytwarzania preform.

Table 6. Parameters of the preform manufacturing processes.

Temperatura [°C]	Prędkość podawania [mm/min]	Prędkość wyciągania [mm/min]
720÷730	3,7	8÷9

Opracowana metoda nadaje się do przygotowywania preform ze szkła krzemionkowego. Praktyczna realizacja wymaga dysponowania rurami szklanymi o odpowiednich średnicach (ϕ_w ; ϕ_z ; ϕ_w/ϕ_z) oraz przeprowadzania prób technologicznych w celu dobrania parametrów procesu (temperatura, prędkość podawania, prędkość wyciągania).

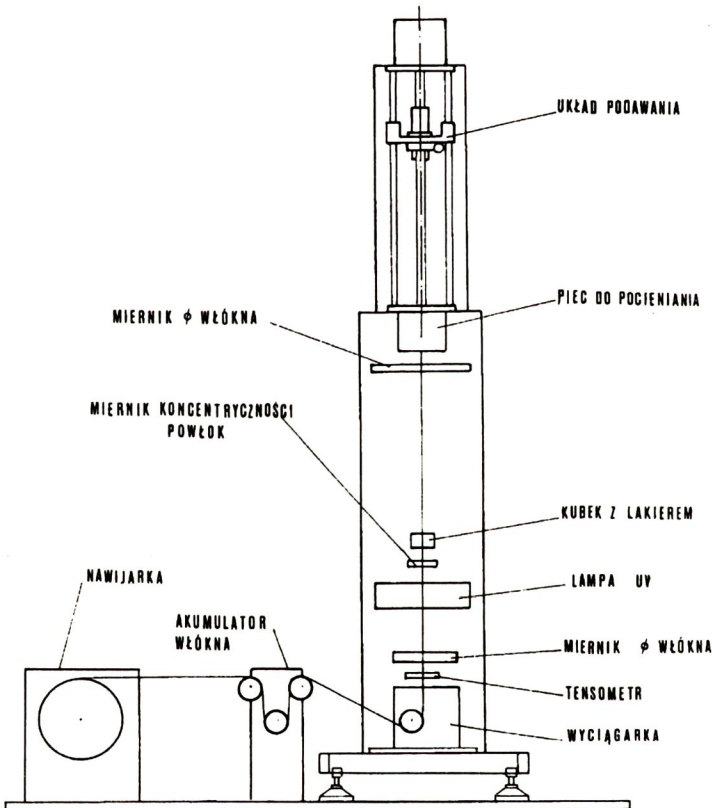
2.3. WYCIĄGANIE KAPILAR

Przeprowadzono kilkanaście procesów wyciągania kapilar o różnej średnicy z przygotowanych preform ze szkła neutralnego (preformy TP, Tabela 5) oraz jeden

proces wyciągania ze szkła krzemionkowego (preforma K, Tabela 5).

W tym celu została przygotowana wieża do wyciągania światłowodów. Przy preformach ze szkła neutralnego stosowany był piec oporowy z kanthalowymi elementami grzewczymi. Do wyciągania kapilar ze szkła krzemionkowego (temp. 2000° C) zastosowano piec z grafitowym elementem grzewczym wraz z doprowadzeniem atmosfery ochronnej (argon). Nakładanie pokrycia zewnętrznego odbywało się poprzez przeciąganie kapilary przez kubek z lakierem i dyszę o odpowiedniej średnicy (od 300 do 1100 μm), oraz utwardzanie poprzez naświetlanie lampą UV. Wyciągane kapilary były nawijane na typowy bęben o obwodzie 1m. Podczas procesu wyciągania przed i po pokryciu mierzona była miernikiem laserowym średnica zewnętrzna kapilary. Wieża wraz z wyposażeniem została przedstawiona na Rys.3.

Z preform ze szkła neutralnego (TP) wyciągane były kapilary o średnicy zewnętrznej do 500 μm - zbliżone do stosowanych w kolumnach chromatograficznych. Z preformy ze szkła krzemionkowego (K) wyciągano kapilary o dużych średnicach (do 950 μm) w celu porównania elastyczności oraz z myślą o wytwarzaniu torów do



Rys.3. Schemat wieży do wyciągania kapilar.

Fig.3. Scheme of the capillaries drawing tower.

przesyłania promienia laserowego. W Tabeli 7 zamieszczono parametry procesów technologicznych wyciągania kapilar.

Tabela 7. Parametry procesów technologicznych wyciągania kapilar.

Table 7. Parameters of the capillary drawing technological processes.

Proces	Prefor- ma	ϕ_z kapilary [μm]	Temp. [$^{\circ}\text{C}$]	Prędkość podawania [mm/min]	Prędkość wyciągania [m/min]	ϕ dyszy [μm]	Temp. nakł. lakieru [$^{\circ}\text{C}$]
T2	TP0-1	230÷330	880	2.0÷2.8	12.0÷8.0	380	37
T4	TP0-1	200÷300	890	1.4÷1.8	15.0÷6.5	360	40÷45'
T5	TP0-2	200÷330	890	1.2÷1.6	14.0÷7.0	380	45
T7	TP2	200÷350	890	4.2	9.0÷4.5	380	50
T8	TP3	200÷340	890	4.2	10.0÷4.5	360	50
T9	TP4	200÷340	895	4.2	11.0÷5.0	360	50
T11	TP0-2	300÷500	895	4.2÷4.5	14.0÷8.2	680	45
K1	K	500÷950	2005	4.2÷8.6	6.0÷2.5	1100	45

2.4. WŁAŚCIWOŚCI KAPILAR

Z wyciągniętych kapilar elastycznych wykonano preparaty mikroskopowe i zmierzono ich wymiary poprzeczne (ϕ_w , ϕ_z , ϕ_p). Elastyczność była badana metodą pomiaru średnicy minimalnej, możliwej do zawiązania pętli.

W Tabeli 8 zostały zebrane parametry właściwości wytworzonych kapilar.

Zostały wytworzone kapilary o wymiarach poprzecznych zbliżonych do następujących typowych kapilar elastycznych :

180/300/340 ($\phi_w/\phi_z/\phi_p$) (T4 - dobra zgodność ϕ_w i ϕ_z , ϕ_p większe $\sim 20 \mu\text{m}$)

250/320/360 (T5 - otrzymana kapilara posiada zbyt małą ϕ_p ($\sim 20 \mu\text{m}$) ϕ_w , ϕ_z zgodne, pokrycie zewnętrzne grubsze o $10 \mu\text{m}$)

100/323/363 (T7 - za duża proporcja ϕ_w/ϕ_z)

75/323/363 (T8 - dobra zgodność $\phi_w/\phi_z/\phi_p$)

30/323/363 (T9 - za duża o $10 \mu\text{m}$ ϕ_w).

Tabela 8. Właściwości wytworzonych kapilar.
Table 8. Properties of the manufactured capillaries.

Proces	Średnica wew. (ϕ_w) [μm] ± 5	Średnica zewn. (ϕ_z) [μm] ± 10	Średnica z pokryciem (ϕ_p) [μm] ± 10	Grubość pokrycia [μm]	Elastyczność ϕ pętli [mm]
T2	150	270	370	50	15÷25
T4	180	305	360	27	40÷50
	190	320	360	20	
T5	230	320	380	30	40÷60
T7	110	300	380	40	20÷35
	130	350	410	30	30÷45
T8	65	280	350	35	20÷35
	75	320	360	20	30÷45
T9	35	280	350	35	20÷35
	40	310	360	25	25÷40
T11	360	500	620	60	100÷140
K1	440	600	880	140	8÷12
	670	870	1000	65	16÷20
	740	940	1060	60	20÷25

Otrzymane wyniki wskazują na poprawność proporcji przygotowanych preform. Tylko niektóre z nich wymagają niewielkich korekt (TP2 i TP4 zastosowano w procesach T7 i T9). Proporcje ϕ_w/ϕ_z tych preform wynoszą odpowiednio 0,38 i 0,15 i są zbyt duże w stosunku do proporcji kapilar 100/323 i 30/323 (odpowiednio 0,30 i 0,09). Rozbieżności parametrów kapilar w stosunku do wzorców są zgodne z przewidywaniami. Wahania wymiarów wyciąganych kapilar mieściły się w zakresie dopuszczalnych tolerancji : ± 3 do $\pm 12 \mu\text{m}$ dla ϕ_w i ± 12 do $\pm 25 \mu\text{m}$ dla ϕ_z .

W większości procesów było nakładane stosunkowo grube pokrycie zewnętrzne (od 30 do 40 μm). Próbowano zmniejszyć grubość nakładanego pokrycia przez zastosowanie dyszy o mniejszej średnicy oraz przez zwiększenie temperatury lakieru nawet do 50°C (mniejsza lepkość). Udało się w procesach T4, T8, T9 osiągnąć grubość od 20 do 25 μm , ale jest to związane z dużymi trudnościami technologicznymi (niebezpieczeństwo zerwania kapilary). Trudności z nakładaniem cienkich pokryć związane są ze stosowanymi materiałami i posiadanymi urządzeniami technologicznymi. W przypadku konieczności nakładania cieńszych pokryć niezbędny jest zakup innych materiałów pokrywowych (polyimidy).

Kapilary wytworzone ze szkła neutralnego (preformy TP) posiadają zbyt małą elastyczność, co jest zgodne z przewidywaniami. Dało się zauważyć także wyraźną zależność elastyczności od jakości preformy (pęcherze, niejednorodności). We frag-

mentach preformy (rury szklane wytwarzane w Krośnieńskich Hutach Szkła w Krośnie w zwykłym cyklu produkcyjnym) zawierających tego typu wady, elastyczność zmniejszała się od 70 do 100%.

Kapilary wyciągnięte ze szkła krzemionkowego (proces K1) charakteryzują się bardzo dobrą elastycznością (ϕ pętli od 8 do 20 mm przy średnicy od 600 do 900 μm). Nie udało się wyciągnąć kapilar o tak dużej średnicy ze szkła neutralnego (proces T11). Kapilary o $\phi_z = 500 \mu\text{m}$ posiadały ~15 krotnie gorszą elastyczność (ϕ pętli od 100 do 140 mm). Wyniki te pokazują jakościową różnicę między szkłem krzemionkowym i neutralnym.

Dobre właściwości mechaniczne kapilar ze szkła krzemionkowego wskazują na możliwość osiągnięcia większych średnic zewnętrznych ($>950 \mu\text{m}$) po wykonaniu odpowiedniej dyszy do nakładania lakieru.

3. PODSUMOWANIE

1. Opracowano metodę wytwarzania rur grubościennych i preform do wyciągania kapilar. Umożliwia ona wytwarzanie preform o praktycznie dowolnej proporcji średnicy wewnętrznej do zewnętrznej, zarówno ze szkieł wieloskładnikowych jak i krzemionkowych. Umiejętność wytwarzania bardzo grubościennych rur szklanych jest niezwykle cenna z uwagi na niedostępność takich rur na rynku. Oprócz zastosowania do wytwarzania kapilar mogą one służyć jako element preformy do wytwarzania światłowodów jednomodowych.

2. Zgodnie z oczekiwaniami niezwykle istotna jest jakość preformy, z której wytwarzane są kapilary. Wszelkie wady materiału w postaci pęcherzy, wtrąceń, niejednorodności praktycznie dyskwalifikują preformę.

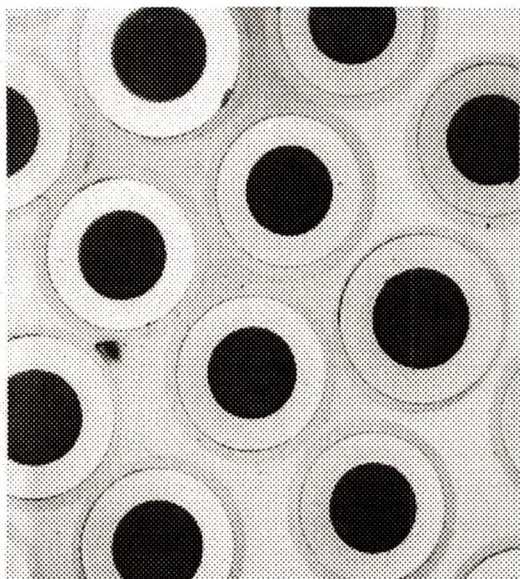
3. Wytworzono szereg kapilar elastycznych o różnych średnicach i proporcjach średnic zewnętrznej i wewnętrznej. Na Rys.4-7 przedstawione są przekroje poprzeczne wytworzonych kapilar.

4. Kapilary ze szkieł neutralnych posiadają zbyt małą elastyczność i wytrzymałość na zerwanie i nie nadają się do praktycznych zastosowań. Posłużyły one do określenia parametrów geometrycznych kapilar i parametrów procesów technologicznych. Wyniki są zgodne z założeniami.

5. Określone parametry procesów technologicznych i parametry geometryczne kapilar mogą służyć za podstawę projektowania procesów wyciągania kapilar elastycznych z materiałów docelowych (szkło krzemionkowe). Po zakupie odpowiednich rur preformowych możliwe jest wytwarzanie kapilar elastycznych w szerokim asortymencie (ϕ_w od 5 do 1200 μm , długość od kilku metrów do kilku kilometrów w zależności od średnicy) oraz ich sprzedaż jako produktu finalnego.

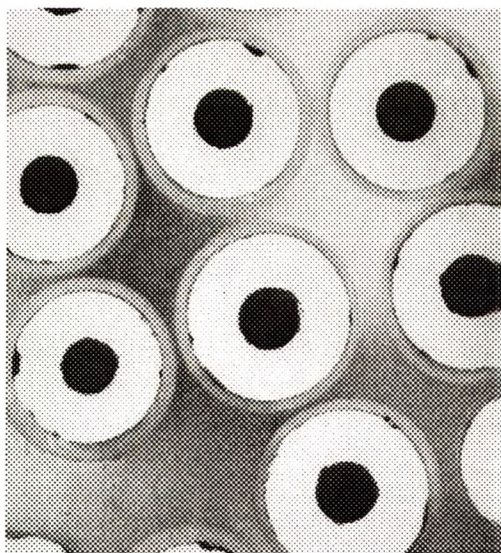
6. Kapilary ze szkła krzemionkowego (proces K1 - Tab.7) posiadają, mimo dużej średnicy (od 600 do 950 μm), bardzo wysoką elastyczność (ϕ pętli od 8 do 25 μm).

- [3] Katalog firmy Restek Corp., 1996
- [4] Prospekt firmy Electro-Fiber Optics Corp. (USA), 1995
- [5] Harrington J.A.: Hollow glass waveguides have use in medical laser delivery systems., Biomedical Optics. 3, 1994, 3
- [6] Harrington J.A., Gregory C.C., Nubbling R.: Hollow waveguides for CO₂ laser surgery.. Infrared fiber optics; Eds. Proc.SPIE 1048, 1989,117-121



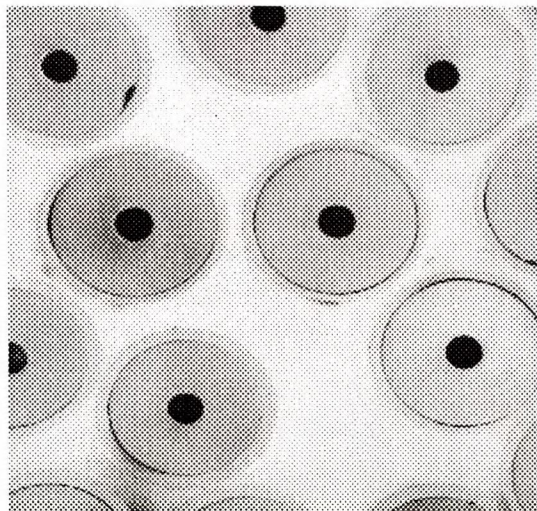
Rys.4. Kapilara 180/300/360, proces T4.

Fig.4. Capillary 180/300/360, process T'4.



Rys.5. Kapilara 130/350/410, proces T7.

Fig.5. Capillary 130/350/410, process T7.

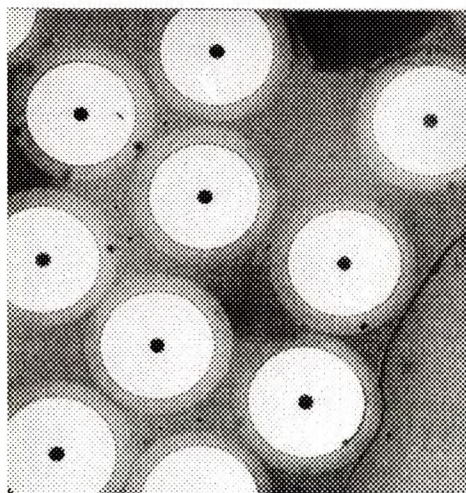


Rys.6. Kapilara 75/320/360, proces T8.

Fig.6. Capillary 75/320/360, process T8.

Rys.7. Kapilara 35/280/350, proces T9.

Fig.7. Capillary 35/280/350, process T9.



4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Prospekt firmy CeramOptec GmbH (Niemcy), 1993
- [2] Prospekt firmy Polymicro Technologies Inc. (USA), 1995
- [3] Katalog firmy Restek Corp., 1996
- [4] Prospekt firmy Electro-Fiber Optics Corp. (USA), 1995
- [5] Harrington J.A.: Hollow glass waveguides have use in medical laser delivery systems; Biomedical Optics. 3, 1994,3
- [6] Harrington J.A., Gregory C.C., Nubbling R.: Hollow waveguides for CO² laser surgery; Infrared fiber optics; Eds. Proc. SPIE 1048, 1989, 117-121