

УДК 666.1.036.2

А.А. Маковецкий, А.А. Замятин, Г.А. Иванов, И.П. Шилов

**ВЫТЯЖКА КАПИЛЛЯРОВ И ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕЧИ
С АЗИМУТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНЫМ ПРОФИЛЕМ
ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ**

A.A. Makovetskii, A.A. Zamyatin, G.A. Ivanov, I.P. Shilov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS,
1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Oblast, 141190, Russia

**DRAWING OF CAPILLARIES AND OPTICAL FIBERS
USING HIGH-TEMPERATURE FURNACE WITH NONUNIFORM
AZIMUTHAL PROFILE OF TEMPERATURE FIELD**

Экспериментально исследовано влияние азимутальной неоднородности температурного поля высокотемпературной печи на эллиптичность поперечных сечений капилляров и оптических волокон. Показана возможность управлять указанной эллиптичностью.

СХЛОПЫВАНИЕ СТЕКЛЯННОЙ ТРУБЫ, ВЫТЯЖКА КАПИЛЛЯРА, РАЗНОТОЛЩИННОСТЬ СТЕНОК КАПИЛЛЯРА, ЭЛЛИПТИЧНОСТЬ КАПИЛЛЯРА, АЗИМУТАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЕЧЬ.

The effect of the nonuniform azimuthal profile of the temperature field in a high-temperature furnace on the cross-section ellipticity of the capillaries and optical fibers has been investigated experimentally. The control possibility for this ellipticity was demonstrated.

COLLAPSE OF GLASS TUBE, CAPILLARY DRAWING, WALL THICKNESS INHOMOGENEITY, CAPILLARY ELLIPTICITY, AZIMUTHAL PROFILE, HIGH-TEMPERATURE FURNACE.

Стекланные капилляры, в частности кварцевые, широко используются в различных областях науки и техники – в хроматографии, вискозиметрии, в волоконно-оптических системах передачи информации, в волоконно-оптических датчиках физических величин, в капиллярных сборках для микроструктурированных оптических волокон [1 – 5].

У капилляров, вытянутых из цилиндрических труб-заготовок с их «подхлопыванием» (неполным схлопыванием) во время процесса вытяжки, часто наблюдается эллиптичность в поперечном сечении. Возможность предсказывать и управлять эллиптичностью капилляра – важный момент в отношении их использования в различных волоконно-оптических устройствах.

На величину эллиптичности влияют два исходных фактора: азимутальные разнотолщинность трубы-заготовки и неоднородность температурного поля высокотемпературной (ВТ) печи, а также относительный диаметр отверстия вытягиваемого капилляра, регулируемый выбором температуры такой печи.

В связи с этим одна из целей данной работы – это выяснить экспериментально характер влияния указанных выше параметров, а именно азимутальной разнотолщинности трубы-заготовки, азимутальной неоднородности температурного поля ВТ-печи и относительного диаметра отверстия вытягиваемого капилляра, на эллиптичность поперечных сечений таких капилляров.

Таблица 1

Характеристики установки для вытяжки капилляров из стеклянных труб-заготовок

Функциональный узел	Основной параметр	Единица измерения	Диапазон значений
Механизм подачи заготовки	Скорость подачи V_3	мм/мин	0,5 – 20
Графитовая высокотемпературная печь с автоматическим регулятором температуры	Температура	°C	500–2200
	Точность		± 0,5
Механизм вытягивания капилляра	Скорость вытяжки $V_в$	см/мин	10 – 100
	База вытяжки	м	0,6 – 1,0
Измеритель внешнего диаметра капилляра (теневого типа)	Диаметр капилляра	мм	0,1 – 4,5

Примечание: База вытяжки – это расстояние от нижнего патрубка печи до тянущих роликов

Если вместо однородной кварцевой трубки взять кварцевую трубу с нанесенными по технологии MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) на ее внутреннюю поверхность слоями легированного кварцевого стекла (т. е. взять несхлопнутую MCVD-преформу) и использовать ВТ-печь с азимутально-неоднородным температурным профилем, то при ее перетяжке в полностью схлопнутый капилляр можно попытаться сформировать оптическое волокно с эллиптической световедущей сердцевиной. Такие волокна обладают оптической анизотропией [6], позволяющей создавать на их основе различные сенсоры интерферен-

ционного типа.

Экспериментальная апробация возможности вытяжки оптических волокон с эллиптической световедущей сердцевиной из несхлопнутых MCVD-преформ представляет вторую цель данной работы.

Вытяжка капилляров из стеклянных труб-заготовок

Установка для вытяжки капилляров содержит стандартный набор компонентов. Их перечень с основными рабочими параметрами приведен в табл. 1.

При вытяжке стеклянных капилляров в ВТ-печи использовались нагреватель-

Таблица 2

Геометрические характеристики нагревательных элементов (НЭ) высокотемпературной печи

Наименование	Размер	
	НЭ-37/30	НЭ-30/30
<i>Нагревательные элементы</i>		
Внутренний диаметр, мм	37	30
Толщина, мм	3,5	3,0
Высота, мм	30	
<i>Продольные сквозные пазы в НЭ</i>		
Количество	20	16
Ширина, мм	1,0	
Угловой интервал между пазами, град	18,0	22,5
Длина перемычки, мм	5,0	4,5
Количество непропиленных пазов в азимутально-неоднородном НЭ	1	2
Угловой интервал между непропиленными пазами, град	–	180

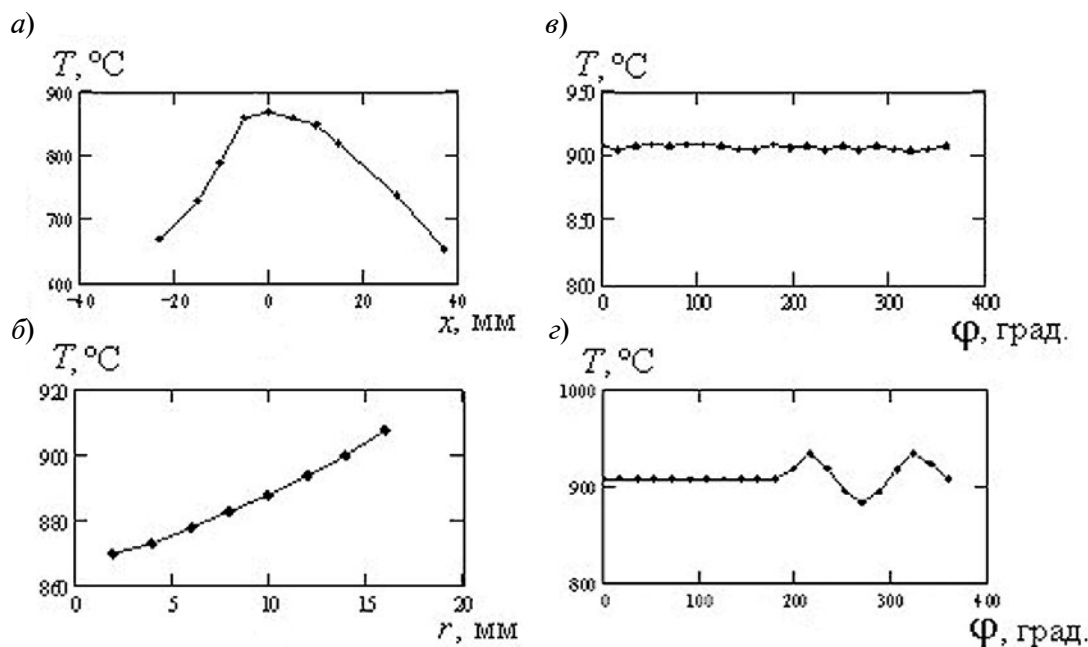


Рис. 1. Обмеренные температурные профили для азимутально-однородного (а – в) и азимутально-неоднородного (г) нагревательных элементов НЭ-37/30 мм/мм при $T_m = 870$ °С. Профили: а – осевой, б – радиальный ($x = 0$, $\varphi = 90$ град), в – азимутальный ($x = 0$, $r = 13$ мм), г – азимутальный

ные элементы (НЭ) корончатого типа. Их основные геометрические характеристики представлены в табл. 2.

Электрическая цепь в нагревательном элементе НЭ-37/30 представляла собой две параллельно соединенные одинаковые части из десяти полосок каждая, что обеспечивало вполне однородное азимутальное распределение температурного поля. У азимутально-неоднородного НЭ-37/30 мм/мм в одной из частей оставался непропиленный один из пазов, что вызывало азимутальную неоднородность его температурного поля. Обмеренные с помощью хромель-алюмелевой термопары осевые, радиальные и азимутальные температурные профили двух использованных НЭ-37/30 мм/мм приведены на рис. 1. Использовалась цилиндрическая система координат (x, r, φ), причем за начало координат была принята точка пересечения оси и срединного сечения НЭ (ось x направлена вдоль оси НЭ); азимутальный угол отсчитывается по часовой стрелке (если смотреть на НЭ сверху вниз), нулевой азимутальный угол $\varphi = 0$ соответству-

ет направлению на оператора вытяжной установки. Важным измеряемым параметром являлась температура T_m в точке начала координат.

В качестве труб-заготовок использовались колбы из легкоплавкого электровакуумного стекла марки СЛ-97-1 от люминесцентных ламп фирм-производителей ЛИСМА (СВЕТ), OSPAM и Philips (изготовлены в Венгрии). Состав стекла и его основные характеристики приведены в табл. 3 и 4 [7]. В экспериментах это стекло разогревали до температуры ≈ 900 °С, что соответствует вязкости $\mu = 10^{3,0} \div 10^{3,5}$ Па·с.

Влияние азимутальной разнотолщинности стеклянной трубы-заготовки на эллиптичность вытягиваемого капилляра. Эксперименты были проведены при использовании в ВТ-печи азимутально-однородного на-

Таблица 3

Состав стекла СЛ-97-1 труб-заготовок (мол.%)

SiO ₂	BaO	CaO	MgO	Na ₂ O	Ka ₂ O	Fe ₂ O ₃
69,5	5,0	5,5	3,5	12,5	4,0	0,12

Таблица 4

Характеристики использованных труб-заготовок из стекла СЛ-97-1

Параметр	Значение
Температура размягчения, °С при вязкости $\mu = 10^{10}$ Па·с $\mu = 10^{6,7}$ Па·с	550 ± 10 675 ± 10
Рабочая температура, °С	≈ 900
Вязкость при рабочей температуре, Па·с	$10^{3,0} - 10^{3,5}$
Внешний диаметр D_T , мм	25,5 – 26,0
Внутренний диаметр d_T , мм	23,5 – 24,4
$\xi_T = d_T / D_T$	0,92 – 0,94
Толщина стенки h_T , мм	0,7 – 0,8

гревательного элемента НЭ-37/30 мм/мм. Предварительно у семейства труб были обмерены поперечные сечения. Геометрические параметры обмера поперечных сечений трубы-заготовки и капилляра, сфор-

мированного на конце «луковицы», а также все производные от них параметры, использованные нами, приведены в табл. 5.

Обмер поперечных сечений труб и капилляров проводили с помощью микроско-

Таблица 5

Принятые обозначения геометрических параметров стеклянных труб-заготовок и вытягиваемых из них капилляров

Геометрический параметр	Обозначение	
	Труба	Капилляр
<i>Измеряемые параметры</i>		
Внешний диаметр большой меньший	$D_{Tб}$ $D_{ТМ}$	$D_{кб}$ $D_{кМ}$
Внутренний диаметр большой меньший	$d_{Tб}$ $d_{ТМ}$	$d_{кб}$ $d_{кМ}$
Среднее значение диаметра внешнего внутреннего	D_T d_T	D_k d_k
Толщина стенки	h_T	h_k
<i>Производные от измеряемых параметров</i>		
Нормированная толщина стенки	$h_{тн}(\varphi) = h_T(\varphi) / \min[h_T(\varphi)]$	$h_{кн}(\varphi) = h_k(\varphi) / \min[h_k(\varphi)]$
Разнотолщинность стенок	$\delta_T = \max[h_T(\varphi)] / \min[h_T(\varphi)]$	$\delta_k = \max[h_k(\varphi)] / \min[h_k(\varphi)]$
Эллиптичность границы поперечного сечения внешней внутренней	$\varepsilon_{T0} = D_{Tб} / D_{ТМ}$ $\varepsilon_{T1} = d_{Tб} / d_{ТМ}$	$\varepsilon_{к0} = D_{кб} / D_{кМ}$ $\varepsilon_{к1} = d_{кб} / d_{кМ}$
Относительный диаметр отверстия	$\xi_T = (d_{Tб} + d_{ТМ}) / (D_{Tб} + D_{ТМ})$	$\xi_k = (d_{кб} + d_{кМ}) / (D_{кб} + D_{кМ})$

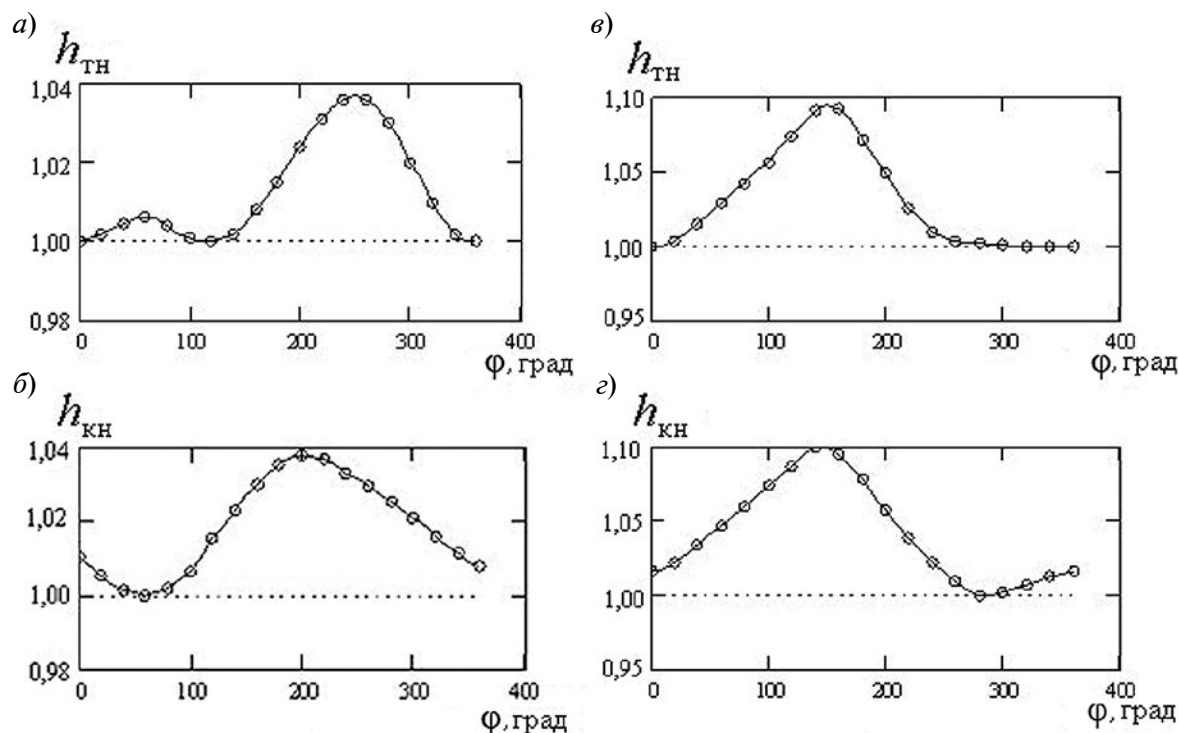


Рис. 2. Обмеренные азимутальные зависимости нормированных значений толщины двух труб-заготовок (а,в) и вытянутых из них капилляров (б,з) при использовании азимутально-однородного НЭ-37/30 мм/мм.

Трубки различались величиной разнотолщинности δ_T : 1,03 (а) и 1,09 (в), а капилляры – величиной относительного диаметра отверстия ξ_k : 0,07 (б) и 0,03 (з), однако их разнотолщинности $\delta_k = 1,05$ (б) и 1,09 (з) повторяли значения, характерные для заготовок

па МБС-1 (Fiber Check). Для экспериментов были отобраны образцы с существенно различными разнотолщинностями: труба № 1 (Philips, изготовлена в Венгрии) с $\delta_T = 1,03$ и труба № 2 (СВЕТ) с $\delta_T = 1,09$.

Из двух отобранных труб-заготовок регулировкой температуры ВТ-печи и скорости подачи заготовки (при фиксированном значении скорости вытяжки) были вытянуты два семейства капилляров с внешним диаметром $D_k = 1,0 - 1,2$ мм и различными значениями относительного диаметра отверстия капилляра ξ_k : от практически геометрически подобной вытяжки ($\xi_k = 0,920 - 0,945$) до практически полного схлопывания ($\xi_k = 0,050$). У всех вытянутых образцов были обмерены азимутальные зависимости толщины стенок $h_k(\varphi)$ и геометрические размеры поперечных сечений.

На рис. 2 приведены измеренные азимутальные зависимости нормированной толщины трубы-заготовки $h_{TH}(\varphi)$ и вытянутого

из нее капилляра $h_{KH}(\varphi)$ (см. обозначения в табл. 5) для двух отобранных труб. Они построены для капилляров, вытянутых с сильным подхлопыванием труб-заготовок:

$$\xi_k \ll \xi_T \quad (0,030 \ll 0,945 \text{ и } 0,050 \ll 0,940 \text{ соответственно}).$$

Из приведенных кривых видно, что в обоих случаях разнотолщинности стенок трубы и вытянутых из них капилляров оказались одинаковыми. Тот же результат был получен и для капилляров, вытянутых с меньшим подхлопыванием трубы-заготовки ($0,050 < \xi_k < 0,940$). Отсюда следует вывод: при использовании НЭ с азимутально-однородным температурным профилем, независимо от допустимой величины относительного диаметра отверстия вытягиваемого капилляра ξ_k ($0 < \xi_k < \xi_T$), разнотолщинность его стенок равна разнотолщинности трубы-заготовки: $\delta_k \approx \delta_T = \text{const}$.

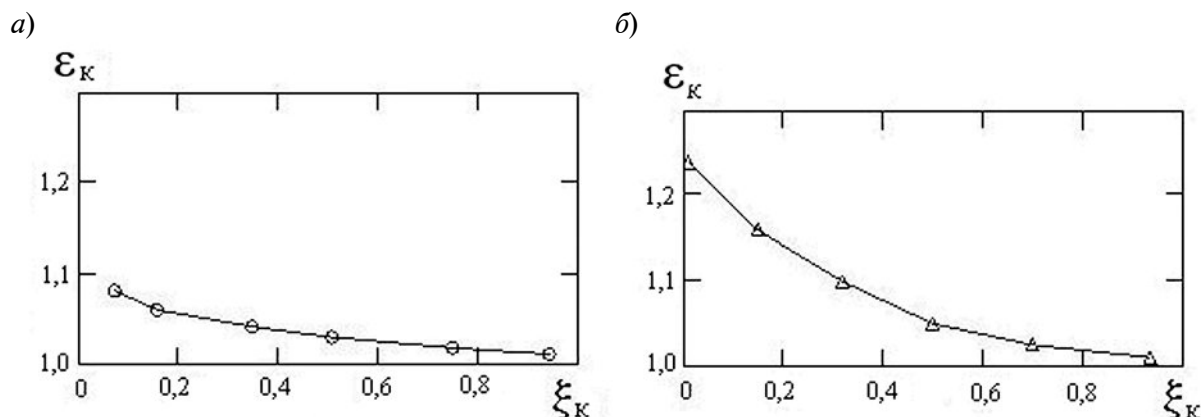


Рис. 3. Экспериментальные зависимости внутренней эллиптичности от относительного диаметра отверстия для капилляров, вытянутых из трубок с различной разнотолщиной δ_t : 1,04 (а) и 1,08 (б); использован азимутально-однородный НЭ-37/30 мм/мм

Существенно иначе зависят от величины ξ_k полученные эллиптичности ϵ_k вытянутых капилляров. На рис. 3 приведены зависимости эллиптичности внутренней границы поперечного сечения ϵ_k от величины ξ_k для капилляров, вытянутых из труб № 1 и № 2.

Из приведенных кривых видно, что эллиптичность внутренней границы поперечного сечения ϵ_k увеличивается при уменьшении величины ξ_k , т. е. при более сильном подхлопывании трубы-заготовки. Внешняя же граница поперечного сечения капилляра практически подобна внешней границе трубы-заготовки для любой допустимой величины ξ_k .

Исходя из двух экспериментально установленных свойств поперечного сечения вытягиваемого капилляра (разнотолщинность капилляра равна разнотолщинности трубки-заготовки, внешняя граница поперечного сечения капилляра – практически круглая), для оценки эллиптичности внутреннего отверстия вытягиваемого капилляра ϵ_k можно вывести следующую формулу:

$$\epsilon_k = [1 - (\delta_t - 1)(\xi_k^{-1} - 1)]^{-1}. \quad (1)$$

Формула (1) справедлива для капилляров с относительными диаметрами отверстий $\xi_k = 0,90 - 0,05$, вытягиваемых из труб-заготовок с разнотолщиной $\delta_t = 1,01 - 1,10$ при использовании НЭ с азимутально-однородным температурным

профилем. Она качественно описывает все экспериментально наблюдаемые зависимости (см. рис. 3), при этом точность оценок – не менее 25 %.

Влияние азимутальной неоднородности температурного поля ВТ-печи на эллиптичность вытягиваемого стеклянного капилляра. В данных экспериментах при вытяжке капилляров использовалась ВТ-печь с азимутально-неоднородным нагревательным элементом НЭ-37/30 мм/мм. По сравнению с азимутально-однородным НЭ-37/30 мм/мм, он обладал некоторой азимутальной неоднородностью температурного поля: $\max T(\varphi) = 934 \text{ }^\circ\text{C}$, $\min T(\varphi) = 882 \text{ }^\circ\text{C}$, $\max T(\varphi) / \min T(\varphi) = 1,06$ (см. рис. 1, з). Указанную неоднородность можно было наблюдать по яркости его свечения.

С использованием азимутально-неоднородного НЭ-37/30 мм/мм из труб с различной разнотолщиной также были вытянуты семейства капилляров с внешним диаметром $D_k = 1,0 - 1,2$ мм и различными значениями относительного диаметра отверстия ξ_k . После обмеров поперечных сечений вытянутых образцов по ним были построены экспериментальные зависимости эллиптичности ϵ_k , внутренней границы поперечного сечения капилляра, от величины ξ_k .

В качестве примера на рис. 4 (кривая 2) приведена зависимость $\epsilon_k = f(\xi_k)$ для ка-

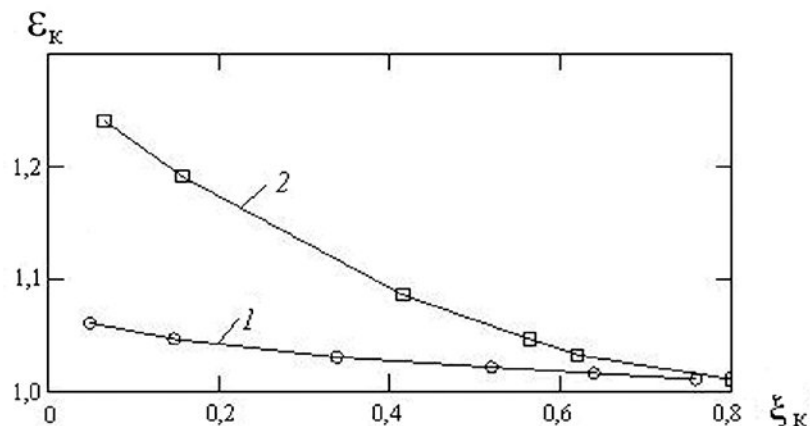


Рис. 4. Экспериментальные зависимости внутренней эллиптичности капилляров, вытянутых из одной и той же трубы-заготовки, от относительных диаметров их отверстий при использовании азимутально-однородного (1) и азимутально-неоднородного (2) НЭ-37/30; $\delta_T = 1,04$

пилляров, вытянутых из трубы № 3 (OSRAM) с геометрическими размерами $D_T/h_T \approx 25,5/0,7$ мм/мм; эллиптичность трубы $\epsilon_T = 1,01$ и ее разнотолщинность $\delta_T = 1,04$. Хотя данная труба имела сравнительно низкую разнотолщинность, эллиптичность внутренней границы поперечных сечений вытянутых из нее капилляров была высокой: она достигала величины $\epsilon_k = 1,24$ при $\xi_k = 0,05$. В то же время при использовании азимутально-однородного НЭ-37/30 вытянутые из этой же трубы капилляры имели небольшую эллиптичность даже при вытяжке с сильным подхлопыванием трубы-заготовки: при $\xi_k = 0,05$ значение $\epsilon_k = 1,06$ (кривая 1 на рис. 4). Приведенные на рис. 4 кривые наглядно показывают, насколько может увеличиться эллиптичность вытягиваемого капилляра при использовании азимутально-неоднородного нагревательного элемента.

Вытяжка капилляров из кварцевых труб-заготовок

Вытяжки капилляров с использованием азимутально-однородного и азимутально-неоднородного нагревательных элементов были проведены также и из кварцевых труб фирмы Heraeus, применяемых в качестве опорных при формировании преформ оптических волокон методом MCVD. Согласно паспортным данным, внешний

диаметр одной из использованных труб составлял $D_T = 25,04$ мм, толщина стенки $h_T = 2,48$ мм, т. е. отношение внутреннего диаметра трубки к внешнему $d_T/D_T = 0,802$. Разнотолщинности стенок у таких труб не превышали 2,5 %, эллиптичности внутренних отверстий – 0,3 %, т. е. по данным параметрам трубы из стекла СЛ-97-1 уступают кварцевым. Как и при вытяжке стеклянных капилляров, были вытянуты семейства капилляров с внешним диаметром $D_k = 1,0 - 1,2$ мм и различными значениями относительного диаметра отверстия капилляра ξ_k [8].

В качестве нагревательных элементов при вытяжке кварцевых капилляров использовались НЭ корончатого типа НЭ-30/30 мм/мм (см. табл. 2). У азимутально-неоднородного НЭ-30/30 мм/мм оставили непропиленными два паза: один напротив другого (через 180 град). Осевой, радиальный и азимутальный температурные профили азимутально-неоднородного НЭ-30/30 мм/мм, обмеренные с помощью вольфрам-рениевой термопары, приведены на рис. 5. Отметим, что при температуре $T_m = 1865$ °С на оси данного НЭ в его срединном сечении азимутальная неоднородность температуры не превышала 70 °С.

На рис. 6 в качестве иллюстрации приведены фотографии поперечных сечений кварцевых капилляров, вытянутых при раз-

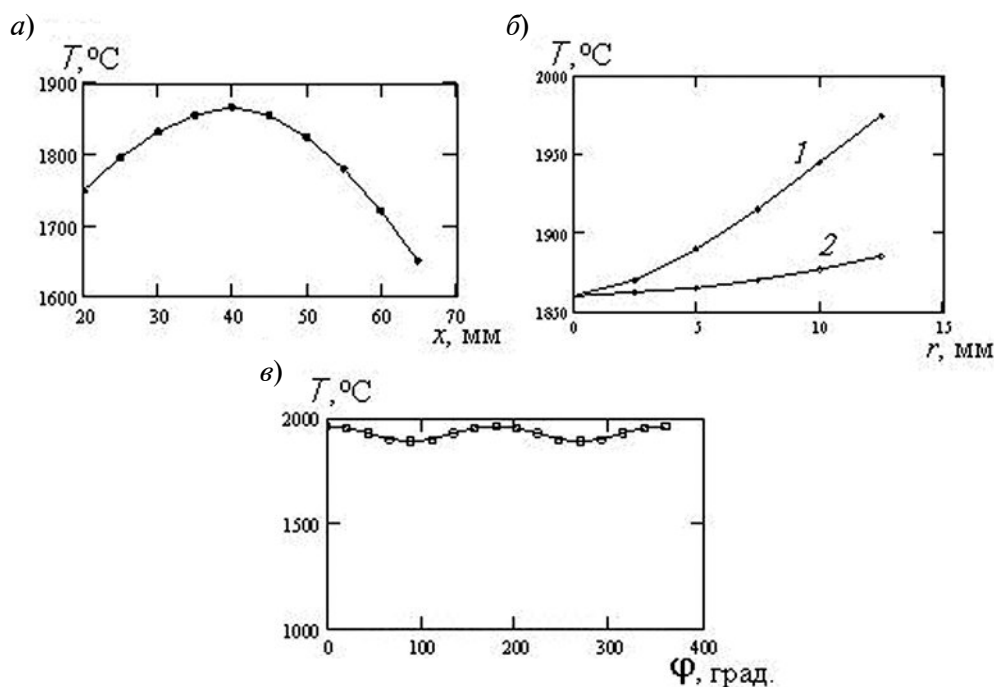


Рис. 5. Обмеренные температурные профили азимутально-неоднородного нагревательного элемента НЭ-30/30 мм/мм при $T_m = 1865$ °С. Профили: *a* – осевой, *б* – радиальный ($x = 0$ (1, 2), $\varphi = 0$ град (1), 90 град (2)), *в* – азимутальный ($x = 0$, $r = 12,5$ мм)

личных значениях относительного диаметра отверстия ξ_k с использованием азимутально-неоднородного НЭ-30/30 мм/мм.

Зависимости внешней и внутренней эллиптичностей ε_{k0} и ε_{k1} от относительного диаметра отверстия ξ_k , построенные по результатам обмеров поперечных сечений вытянутых капилляров, приведены на рис. 7. Отметим основные характерные свойства приведенных кривых.

Во-первых, для обоих использованных нагревательных элементов внутренние эл-

липтичности ε_{k1} монотонно возрастают при уменьшении относительного диаметра отверстия ξ_k (при увеличении температуры НЭ), стремясь к своим максимальным значениям при $\xi_k \rightarrow 0$ (рис. 7, б). При этом для любых допустимых значений ξ_k ($0 \leq \xi_k \leq \xi_T$) большей внутренней эллиптичностью обладают капилляры, вытянутые с использованием азимутально-неоднородного НЭ. Этот факт можно объяснить непосредственным влиянием еще одного фактора (помимо разнотол-

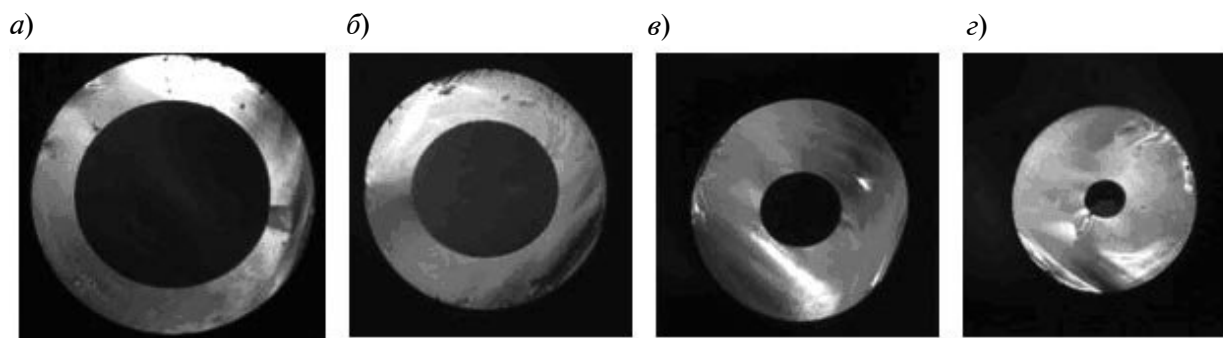


Рис. 6. Фотографии поперечных сечений кварцевых капилляров с различными значениями относительного диаметра отверстия ξ_k : 0,75 (*a*), 0,60 (*б*), 0,37 (*в*), 0,24 (*г*); использован азимутально-неоднородный НЭ-30/30 мм/мм

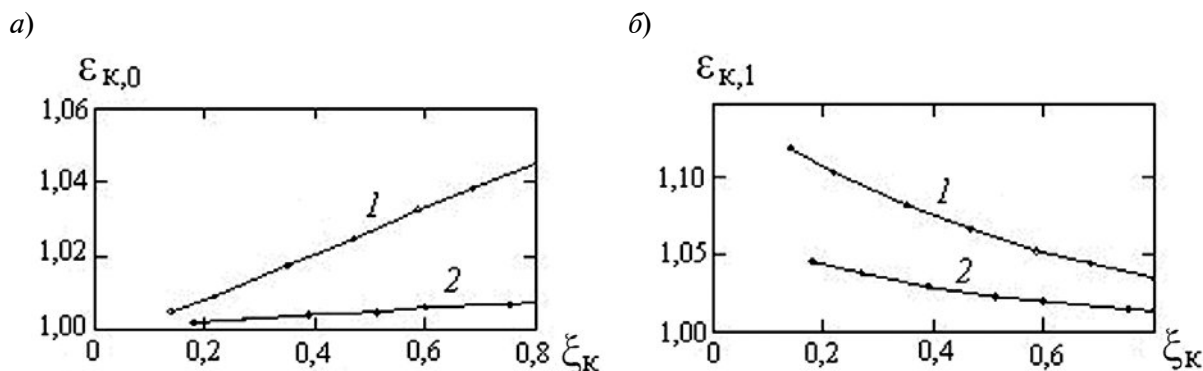


Рис. 7. Экспериментальные зависимости внутренней (а) и внешней (б) эллиптичностей кварцевых капилляров от относительных диаметров их отверстий; использованы азимутально-неоднородный (1) и азимутально-однородный (2) НЭ-30/30 мм/мм

щинности трубы-заготовки), вызывающего внутреннюю эллиптичность капилляра: азимутальной неоднородности температурного поля. Эта неоднородность проявляется также в том, что деформация поперечного сечения вытянутого капилляра (относительно поперечного сечения исходной трубы-заготовки) и связанная с ней эллиптичность наблюдаются даже при вытяжке без подхлопывания (при $\xi_{к} = \xi_{Т}$). В результате у вытянутых при этих условиях капилляров внутренняя эллиптичность оказывается большей, чем у исходной трубы-заготовки. При использовании азимутально-однородного нагревательного элемента при $\xi_{к} = \xi_{Т}$ имеет место геометрически подобная перетяжка трубы-заготовки в капилляр.

Во-вторых, зависимости внешних эллиптичностей $\epsilon_{к0}$ от относительного диаметра

отверстия $\xi_{к}$ ведут себя иначе (рис. 7, а). При использовании азимутально-однородного НЭ внешняя эллиптичность $\epsilon_{к0}$ практически не зависит от величины $\xi_{к}$ и равна внешней эллиптичности трубы-заготовки $\epsilon_{т0}$. В случае использования азимутально-неоднородного НЭ сначала (при $\xi_{к} = \xi_{Т}$) внешняя эллиптичность капилляра $\epsilon_{к0}$ больше внешней эллиптичности трубы-заготовки $\epsilon_{т0}$. При уменьшении величины $\xi_{к}$ внешняя эллиптичность монотонно уменьшается, стремясь к единице (т. е. внешняя граница поперечного сечения капилляра стремится к окружности).

Вытяжка оптических волокон из несхлопнутых MCVD-преформ

На основе экспериментов по вытяжке кварцевых капилляров была опробована технология формирования оптического во-

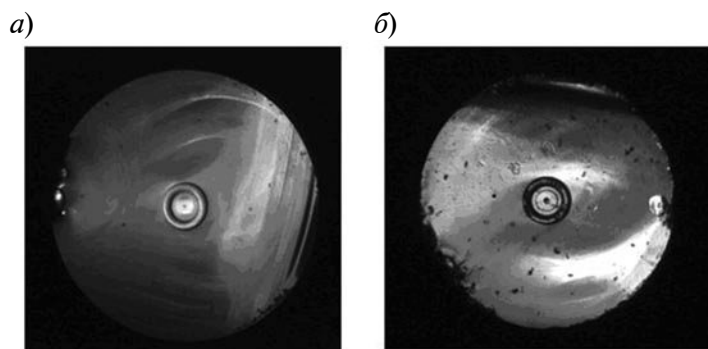


Рис. 8. Фотографии поперечных сечений волокон, вытянутых из MCVD-преформы (несхлопнутой) с использованием азимутально-неоднородного (а) и азимутально-однородного (б) НЭ-30/30 мм/мм

локна с эллиптической сердцевинной из несхлопнутой MCVD-преформы путем ее перетяжки на вытяжной установке в полностью схлопнутый капилляр (волокно), с использованием азимутально-неоднородного нагревательного элемента НЭ-30/30 мм/мм.

На внутреннюю поверхность кварцевой трубы марки Heraeus с внешним диаметром 25 мм и толщиной 2,5 мм на MCVD-станке были нанесены три оболочки (слоя) легированного кварцевого стекла: боросиликатная $B_2O_3 \cdot SiO_2$ (напрягающая оболочка), силикатная SiO_2 (буферная) и германосиликатная $GeO_2 \cdot SiO_2$ (световедущая сердцевина). Сначала из полученной преформы было вытянуто волокно с внешним диаметром 1,2 мм, при этом был использован азимутально-однородный НЭ-30/30 мм/мм. Затем из той же преформы было вытянуто аналогичное волокно и использован азимутально-неоднородный НЭ-30/30 мм/мм. Фотографии поперечных сечений вытянутых волокон приведены на рис. 8. На них явно видно, что световедущая сердцевина волокна, вытянутого с использованием азимутально-неоднородного НЭ-30/30 мм/мм, обладает небольшой эллиптичностью.

Наконец, из той же MCVD-преформы были вытянуты образцы одномодовых опти-

ческих волокон диаметром 125 мкм с эллиптической сердцевинной и с покрытием из УФ-отверждаемого уретанаакрилата. На этих образцах было получено двулучепреломление с длиной биений примерно 8 мм.

Итак, проведенные экспериментальные исследования позволили получить следующие результаты:

найдена связь эллиптичности поперечных сечений вытянутых капилляров с их относительным диаметром отверстия, разнотолщинностью используемой трубы-заготовки, а также с азимутальной неоднородностью температурного поля высокотемпературной печи;

впервые были сформированы образцы двулучепреломляющих оптических волокон с эллиптической световедущей сердцевинной с применением нетрадиционной технологии: непосредственно на вытяжной установке из несхлопнутой MCVD-преформы, благодаря использованию азимутально-неоднородного температурного поля высокотемпературной печи;

формируемые по новой технологии образцы оптических волокон могут быть использованы в волоконно-оптических сенсорах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко Б.А. Капиллярная хроматография. М.: Наука, 1982. 221 с.
2. Замятин А.А., Маковецкий А.А., Милявский Ю.С. Об измерении вязкости композиций на основе уретанаакрилатов для УФ-отверждаемых защитных покрытий волоконных световодов // Журнал прикладной химии. 2002. Т. 75. № 10. С. 1717–1721.
3. Прокофьева Л.П., Сахаров В.К., Щербатов В.В. Одномодовые волоконные разветвители, устойчивые к внешним воздействиям // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. 2004. Т. 2. С. 31 – 32.
4. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M. All-silica single-mode fiber with photonic crystal cladding // Opt. Lett. 1996. Vol. 21, No. 19. P. 1547–1549.

5. Ryabko M.V., Chamorovskii Yu.K., Morshnev S.K., Starostin N.I. Optical current sensor based on microstructured optical fiber // EOS Annual Meeting, September, 29 – October, 2, 2008, Paris, France. Vol. 4. Micro- and Nanoscale Photonic System. P. 89–90.

6. Katsuyama T., Matsumura H., Suganuta T. Reduced pressure collapsing MCVD method for single polarization optical fibers // J. Lightwave Technol. 1984. Vol. LT-2. No. 5. P. 634 – 638.

7. Федоров В.В. Люминесцентные лампы. М: Атомиздат, 1992. 128 с.

8. Замятин А.А., Маковецкий А.А. Вытяжка кварцевых капилляров с подсхлопыванием исходной трубки // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 8. С. 85–89.

REFERENCES

1. Rudenko B.A. Kapilliarnaya khromatografiya. Moscow, Nauka, 1982. 221 p. (rus)
2. Zamiatin A.A., Makovetskii A.A., Mili-

- avskii Iu.S. Ob izmerenii viazkosti kompozitsii na osnove uretanakrilatov dlia UF-otverzhdaemykh zashchitnykh pokrytii volokonnykh svetovodov.

Zhurnal prikladnoi khimii. 2002. T. 75, № 10, pp. 1717–1721. (rus)

3. **Prokof'eva L.P., Sakharov V.K., Shcherbakov V.V.** Odnomodovye volokonnye razvetviteli, ustoychivye k vneshnim vozdeistviyam. Trudy RNTORES im. A.S. Popova. 2004, T. 2, pp. 31–32. (rus)

4. **Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M.** All-silica single-mode fiber with photonic crystal cladding. Opt. Lett. 1996. Vol. 21, No. 19, R. 1547–1549.

5. **Ryabko M.V., Chamorovskii Yu.K., Morshnev S.K., Starostin N.I.** Optical current sensor based on microstructured optical fiber. EOS Annual Meeting,

September, 29 –October, 2, 2008, Paris, France. Vol. 4. Micro- and Nanoscale Photonic System. P. 89–90.

6. **Katsuyama T., Matsumura H., Suganuta T.** Reduced pressure collapsing MCVD method for single polarization optical fibers. J. Lightwave Technol. 1984, Vol. LT-2, No. 5, R. 634–638.

7. **Fedorov V.V.** Liuminestsentnye lampy. Moscow, Atomizdat, 1992. 128 p. (rus)

8. **Zamiatin A.A., Makovetskii A.A.** Vytiazhka kvartsevykh kapillarov s podskhlopyvaniem iskhodnoi trubki. Opticheskii zhurnal. 2006, Vol. 73, No. 8, pp. 85–89. (rus)

МАКОВЕЦКИЙ Александр Андреевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. 141190, Россия, Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, 1 maz226@ms.ire.rssi.ru

ЗАМЯТИН Александр Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. 141190, Россия, Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

ИВАНОВ Геннадий Анатольевич – доктор химических наук, заведующий лабораторией волоконных световодов и элементов на их основе (лаб. 226) Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. 141190, Россия, Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

ШИЛОВ Игорь Петрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией элементов систем лазерной связи (лаб. 276) Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. 141190, Россия, Московская область, г. Фрязино, пл. Введенского, 1