

ЭЛЛИПТИЧНОСТЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ СТЕКЛЯННОГО КАПИЛЛЯРА, СФОРМИРОВАННОГО ПЕРЕТЯЖКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЫ-ЗАГОТОВКИ

© 2012 г. А.А. Маковецкий, канд. физ.-мат. наук; А.А. Замятин, канд. техн. наук; Г.А. Иванов, доктор хим. наук

Филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская обл.

E-mail: maz226@ms.ire.rssi.ru

Экспериментально исследовано влияние на эллиптичность поперечного сечения вытягиваемого капилляра двух технологических параметров – азимутальной неоднородности толщины стенки (разнотолщинности) трубы-заготовки и азимутальной неоднородности температурного поля высокотемпературной печи. В экспериментах использовали тонкостенные трубы из электровакуумного стекла марки СЛ-97-1. Установлено, что при использовании печи с азимутально-однородным температурным полем разнотолщинности капилляра и трубы-заготовки совпадают, независимо от «подсхлопывания» (неполного схлопывания) трубы-заготовки при ее перетяжке в капилляр. Эллиптичность же вытягиваемого капилляра, напротив, зависит от «подсхлопывания», возрастая при его увеличении. Азимутальная неоднородность температурного поля приводит к заметной эллиптичности поперечных сечений даже в капиллярах, вытянутых из труб-заготовок с малой разнотолщинностью.

Ключевые слова: «подсхлопывание» стеклянной трубы-заготовки, вытяжка капилляра, разнотолщинность и эллиптичность капилляра, азимутальный профиль температурного поля печи вытяжки.

Коды OCIS: 220.0220.

Поступила в редакцию 27.09.2012.

Стеклянные капилляры (в частности, кварцевые) широко используются в различных областях науки и техники — в хроматографии, в вискозиметрии, в волоконно-оптических системах передачи информации, в волоконно-оптических датчиках физических величин, в капиллярных сборках для микроструктурированных оптических волокон [1–5]. Формируют капилляры перетяжкой на вытяжной установке исходных цилиндрических труб-заготовок. Возможны как геометрически подобная перетяжка трубы в капилляр, так и перетяжка с «подсхлопыванием» исходной трубы. В первом случае отношения внутреннего диаметра к внешнему у трубы и капилляра одинаковы; во втором случае за счет влияния поверхностного натяжения у капилляра это отношение становится меньше, чем у исходной трубы.

Заметим, что при перетяжке с «подсхлопыванием» тонкостенных труб-заготовок внутренние границы поперечных сечений вытянутых

капилляров зачастую оказываются эллиптическими (некруглыми), хотя у исходной трубы-заготовки поперечное сечение вполне круглое. Это явление нежелательно при использовании капилляров, например, в нестандартных волоконно-оптических разъемах, а также при изготовлении стеклянных (кварцевых) фильер для нанесения покрытий оптических волокон. В то же время могут найти практическое применение капилляры с большой эллиптичностью. Поэтому анализ механизмов появления эллиптичности в вытягиваемых капиллярах представляет научный и практический интерес.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование влияния на эллиптичность поперечного сечения вытягиваемого капилляра двух факторов — азимутальной неоднородности толщины исходной трубы-заготовки и азимутальной неоднородности температурного поля высокотемпературной (ВТ) печи.

1. Экспериментальная установка и методики обработки результатов экспериментов

Установка для вытяжки капилляров включает стандартный набор компонентов: механизм подачи заготовки, графитовую ВТ-печь с автоматическим регулятором температуры, механизм вытягивания, измеритель внешнего диаметра вытягиваемого капилляра. Диапазон скоростей подачи заготовки V_3 составлял 0,5–20 мм/мин, скоростей вытяжки V_6 — 10–100 см/мин. Температура ВТ-печи могла регулироваться в пределах 500–2200 °С с точностью $\pm 0,5$ °С. Измеритель диаметра вытягиваемого капилляра теневого типа обеспечивал его контроль в пределах 0,1–4,5 мм. База вытяжки, т. е. расстояние от нижнего патрубка ВТ-печи до механизма вытягивания, составляла $\approx 1,0$ м.

В ВТ-печи использовали нагревательные элементы (НЭ) типа «корона» НЭ-37/30 с геометрическими размерами: внутренний диаметр 37 мм, толщина 3,5 мм, высота 30 мм. Продольные пазы шириной 1,0 мм были нарезаны в НЭ через каждые 18° попеременно с одного и другого торца на глубину 25 мм, оставляя перемычку длиной 5 мм; общее количество пазов — 20. Электрическая цепь НЭ представляла собой две параллельно соединенные одинаковые части по 10 полос каждая, что обеспечивало однородное азимутальное распределение температурного поля. Для создания азимутально-неоднородного поля в одной из частей НЭ оставляли непрорезанным один из пазов. Конструкция графитового нагревателя была сборной. Она состояла из стационарно размещенного на верхнем фланце ВТ-печи основания-токоввода и сменного НЭ, фиксируемого на основании с помощью графитовых винтов, что позволяло легко модифицировать температурный профиль ВТ-печи.

Для описания температурного профиля ВТ-печи и геометрии поперечных сечений исходной трубы-заготовки, «луковицы» и вытянутого капилляра введем полярную систему координат (x, r, φ) . Ось x направим вдоль оси НЭ, разместив начало координат в срединном его сечении. Азимутальный угол будем отсчитывать по часовой стрелке (если смотреть на НЭ сверху вниз); нулевой угол $\varphi = 0^\circ$ соответствует направлению на оператора. Схема обмера поперечных сечений трубы и капилляра приведена на рис. 1, где обозначено: $h_T(\varphi)$ и $h_K(\varphi)$ — азимутальные зависимости толщины стенок трубы и капилляра

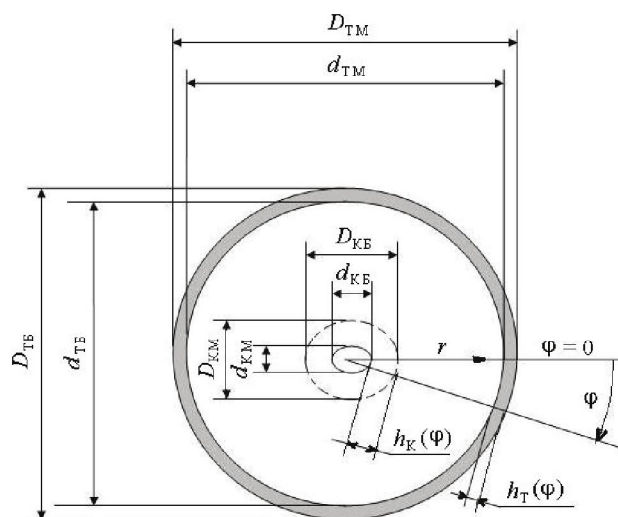


Рис. 1. Схема обмера поперечных сечений трубы-заготовки и вытянутого из нее капилляра.

ляра соответственно; D_T и d_T — средние значения внешнего и внутреннего диаметров трубы; d_{KB} и d_{KM} — больший и меньший внутренние диаметры капилляра; D_{KB} и D_{KM} — больший и меньший внешние диаметры капилляра. В принятых обозначениях разнотолщинности стенок трубы и капилляра определим как $\delta_T = \max h_T(\varphi) / \min h_T(\varphi)$ и $\delta_K = \max h_K(\varphi) / \min h_K(\varphi)$ соответственно, эллиптичности внутренней и внешней границ поперечного сечения капилляра как $\varepsilon_K = d_{KB} / d_{KM}$ и $\varepsilon_{KB} = D_{KB} / D_{KM}$ соответственно, относительные диаметры отверстий капилляра и трубы как $\xi_K = (d_{KB} + d_{KM}) / (D_{KB} + D_{KM})$ и $\xi_T = (d_{TB} + d_{TM}) / (D_{TB} + D_{TM})$ соответственно. Обмер поперечных сечений труб и капилляров проводили с помощью микроскопа (МБС-1, Fiber Check). На рис. 2 приведено фото поперечного сечения одного из вытянутых капилляров.

В качестве труб-заготовок использовали колбы из легкоплавкого электровакуумного стекла марки СЛ-97-1 от люминесцентных ламп фирм-производителей ЛИСМА (СВЕТ), OSPAM и Philips. Внешний диаметр труб составлял $D_T = 25,5\text{--}26,0$ мм, толщина стенки $h_T = 0,7\text{--}0,8$ мм, т. е. $\xi_T = 0,92\text{--}0,945$. Состав стекла СЛ-97-1 (СВЕТ) следующий: SiO_2 — 69,5 мол. %, BaO_2 — 5 мол. %, CaO_2 — 5,5 мол. %, MgO_2 — 3,5 мол. %, Na_2O — 12,5 мол. %, K_2O — 4,0 мол. %, Fe_2O_3 — 0,12 мол. %. Температура размягчения стекла СЛ-97-1 составляла 550 ± 10 °С при вязкости $\mu = 10^{10}$ Па·с и 675 ± 10 °С при вязкости $\mu = 10^{6,7}$ Па·с [7]. В экспериментах это стекло разогревали до температуры ≈ 900 °С, что соответствует вязкости

$\mu = 10^{3,0}-10^{3,5}$ Па·с. Температурные свойства аналогов стекла СЛ-97-1 от приведенных данных отличаются незначительно. Для обмеров температурных профилей НЭ-37/30 использовалась хромель-алюмелевая термопара.



Рис. 2. Фото поперечного сечения одного из вытянутых капилляров: внешний диаметр капилляра $D_K = 1000$ мкм, больший внутренний диаметр $d_{KB} = 207$ мкм, меньший внутренний диаметр $d_{KM} = 195$ мкм, относительный диаметр отверстия $\xi_K = 0.206$, эллиптичность отверстия $\varepsilon_K = 1,12$.

2. Исследование влияния разнотолщинности трубы-заготовки на эллиптичность вытягиваемых капилляров

В данных экспериментах использовались азимутально-однородный НЭ-37/30 и трубы-заготовки с различной разнотолщинностью. Предварительно для данного НЭ были измерены профили температурного поля. Результаты приведены на рис. 3, где через T_m обозначена температура на оси НЭ в срединном его сечении. Из приведенной на рис. 3,б кривой $T(\varphi)$ видно, что данный НЭ обладал высокой азимутальной однородностью температурного поля. У отобранных для экспериментов труб-заготовок были измерены азимутальные зависимости толщины стенок $h_T(\varphi)$ и по ним определены значения их разнотолщинности, которые были в пределах $\delta_T = 1,03-1,09$ (в зависимости от завода-производителя).

Из каждой выбранной трубы-заготовки регулировкой температуры ВТ-печи и скорости подачи заготовки (при фиксированном значении скорости вытяжки) было вытянуто семейство капилляров с одинаковым внешним диаметром $D_K = 1,0-1,2$ мм и различными значениями относительного диаметра отверстия капилляра ξ_K — от практически геометрически подобной вытяжки ($\xi_K = 0,92$) до практически полного схлопывания ($\xi_K = 0,05$). У всех вытянутых образцов были измерены азимутальные зависи-

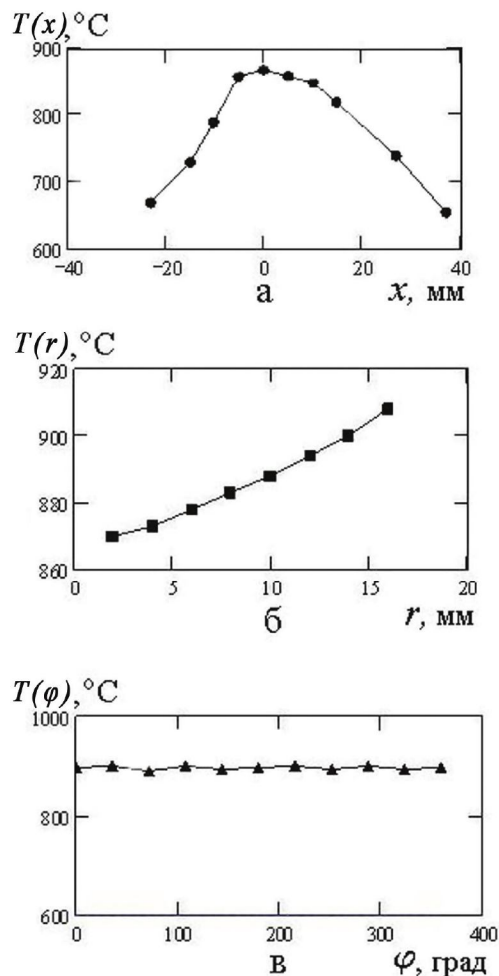


Рис. 3. Обмеренные осевой $T(x)$ — (а), радиальный $T(r)$ — (б) и азимутальный $T(\varphi)$ — (в) температурные профили для азимутально-однородного НЭ-37/30 при $T_m = 870$ °С. Зависимость $T(\varphi)$ была построена для срединного сечения НЭ ($x = 0$ мм) и $r = 13$ мм, зависимость $T(r)$ — для $x = 0$ мм и $\varphi = 90^\circ$.

мости толщин стенок $h_K(\varphi)$ и геометрические размеры поперечных сечений.

На рис. 4 приведены азимутальные зависимости нормированной толщины трубы-заготовки $h_{TH}(\varphi) = h_T(\varphi) / \min h_T(\varphi)$ и вытянутого из нее капилляра $h_{KH}(\varphi) = h_K(\varphi) / \min h_K(\varphi)$ для двух труб с различными значениями разнотолщинности. Труба № 1 (Philips. Made in Hungary) имела наименьшую разнотолщинность ($\delta_T = 1,03$), труба № 2 (СВЕТ) — наибольшую ($\delta_T = 1,09$). Обе кривые построены для капилляров, вытянутых с сильным «подсхлопыванием» труб-заготовок ($\xi_K = 0,03$ и $0,05$ соответственно, тогда как $\xi_T = 0,945$ и $0,94$). Из приведенных кривых видно, что в обоих случаях разнотолщинность стенок трубы и вытянутых из них капилляров оказались одинаковой. То же

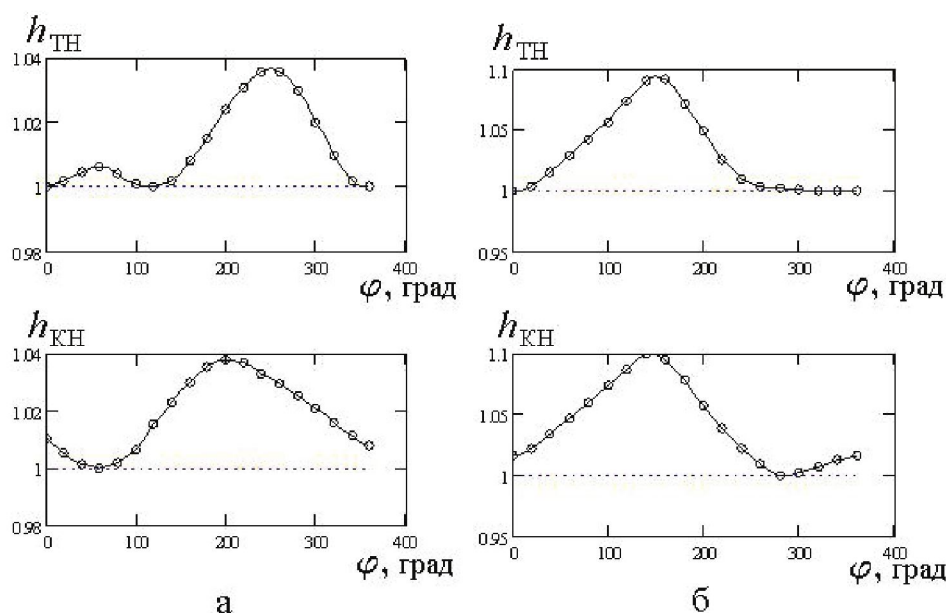


Рис. 4. Измеренные азимутальные зависимости нормированной толщины трубы-заготовки $h_{TH}(\varphi)$ и нормированной толщины вытянутого из нее капилляра $h_{TK}(\varphi)$: (а) — для трубы № 1 (Philips (Made in Hungary), $D_T/h_T = 25,5/0,7$ мм/мм, $\delta_T = 1,04$, $D_K = 1,2$ мм, $\delta_K = 1,05$, $\xi_K = 0,07$); (б) — для трубы № 2 (СВЕТ), $D_T/h_T = 25,7/0,7$ мм/мм, $\delta_T = 1,08$, $D_K = 1,1$ мм, $\delta_K = 1,09$, $\xi_K = 0,03$. НЭ-37/30 — азимутально-однородный.

имело место и для капилляров, вытянутых с меньшим «подсхлопыванием» трубы-заготовки ($0,05 < \xi_K < 0,92$). Отсюда следует вывод: при использовании НЭ с азимутально-однородным температурным профилем, независимо от величины относительного диаметра отверстия вытягиваемого капилляра ξ_K , разнотолщинность его стенок равна разнотолщинности трубы-заготовки, т. е. $\delta_K \approx \delta_T = \text{const}$.

Существенно иначе зависит от величины ξ_K эллиптичность вытянутых капилляров. На рис. 5 приведены зависимости эллиптичности внутренней границы поперечного сечения ε_K от величины ξ_K для капилляров, вытянутых из труб № 1 (Philips. Made in Hungary) и № 2 (СВЕТ). Из приведенных кривых видно, что эллиптичность внутренней границы поперечного сечения ε_K увеличивается при уменьшении величины ξ_K , т. е. при более сильном «подсхлопывании» трубы-заготовки. Внешняя граница поперечного сечения капилляра практически подобна аналогичной границе трубы-заготовки и не зависит от величины ξ_K .

Исходя из двух экспериментально установленных фактов (разнотолщинность капилляра равна разнотолщинности трубы-заготовки, внешняя граница поперечного сечения капилляра практически круглая), для оценки зависимости эллиптичности капилляра от разно-

толщинности трубы и относительного диаметра вытягиваемого капилляра можно вывести формулу:

$$\varepsilon_k = \frac{1}{1 - (\delta_T - 1) \cdot (\xi_k^{-1} - 1)}. \quad (1)$$

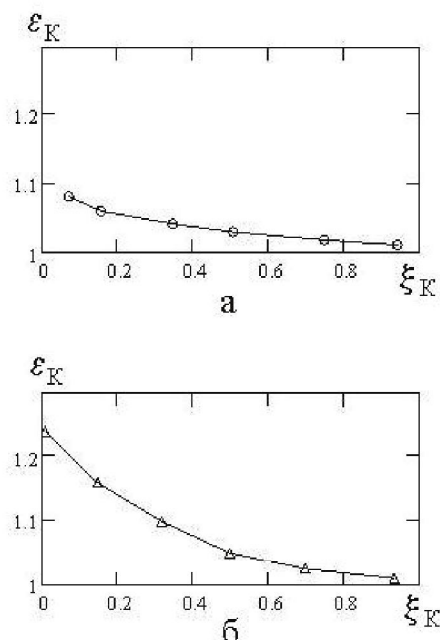


Рис. 5. Экспериментальные зависимости коэффициента эллиптичности капилляра ε_K от относительного диаметра отверстия ξ_K для капилляров, вытянутых из трубок: (а) — из трубы № 1 (Philips (Made in Hungary), $\delta_T = 1,04$); (б) — из трубы № 2 (СВЕТ, $\delta_T = 1,08$). НЭ-37/30 — азимутально-однородный.

Отметим, что формула (1) выведена для вытяжки капилляров при использовании НЭ с азимутально-однородным температурным профилем, для труб-заготовок с разнотолщинностью $\delta_T = 1,03 \div 1,09$ и относительных диаметров отверстий капилляра $\xi_K = 0,9 \div 0,05$. Она качественно описывает все экспериментально полученные зависимости, представленные на рис. 4, при этом точность оценок не превышает 10%.

3. Исследование влияния азимутальной неоднородности температурного поля ВТ-печи на эллиптичность вытягиваемых капилляров

В данных экспериментах при вытяжке капилляров использовали ВТ-печь с азимутально-неоднородным нагревательным элементом НЭ-37/30. Азимутальный температурный профиль такого НЭ приведен на рис. 6. Для сравнения на том же рисунке приведен аналогичный профиль азимутально-однородного НЭ-37/30. Оба обмера были проведены при одном и том же рабочем напряжении нагревательного элемента. В этом случае идентичные (левые) части обоих НЭ прогревались до одинаковой температуры. Правые части НЭ прогревались по-

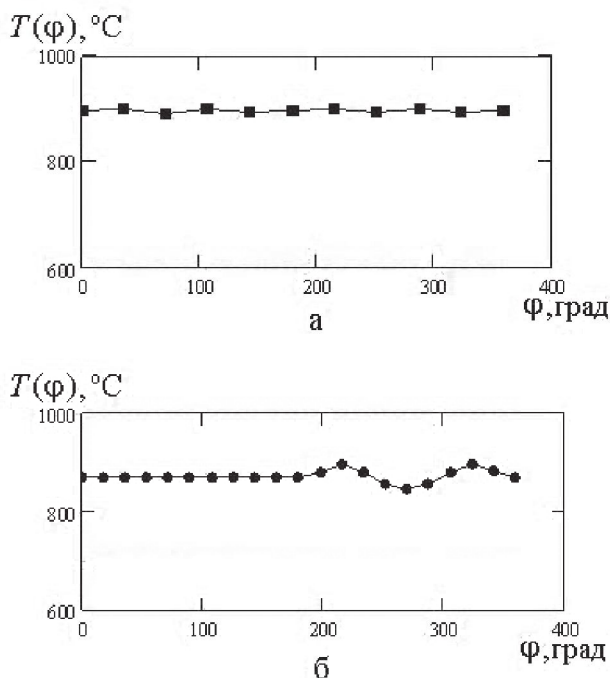


Рис. 6. Измеренные азимутальные температурные профили $T(\varphi)$ для азимутально-однородного НЭ-37/30 — (а) и азимутально-неоднородного НЭ-37/30 — (б). Оба графика построены для срединных сечений НЭ ($x = 0$ мм) и $r = 13$ мм; напряжения на нагревательных элементах одинаковое; $T_m \approx 870^\circ\text{C}$.

разному. Электрическое сопротивление части НЭ с одним отсутствующим пазом было меньшим, чем у однородной части. Поэтому через нее проходил ток больший, чем через однородную левую часть НЭ. В результате больший ее участок (с прорезами) нагревался сильнее, а меньший (с непрорезанным пазом) — слабее однородной части НЭ. Это можно было наблюдать визуально.

С помощью азимутально-неоднородного НЭ-37/30 также было вытянуто семейство капилляров с одинаковым внешним диаметром $D_K = 1,0\text{--}1,2$ мм и различными значениями относительного диаметра отверстия ξ_K . После обмеров поперечных сечений вытянутых образцов по ним были построены экспериментальные зависимости эллиптичности внутренней границы поперечного сечения капилляра ε_K от величины ξ_K .

На рис. 7 в качестве примера приведены зависимости $\varepsilon_K = f(\xi_K)$ для капилляров, вытянутых из трубы № 3 (OSRAM) с геометрическими размерами $D_T/h_T \approx 25,5/0,7$ мм/мм, эллиптичностью $\varepsilon_T = 1,01$ и разнотолщинностью $\delta_T = 1,04$. Кривая (1) получена с использованием азимутально-однородного НЭ-37/30, кривая (2) — использованием азимутально-неоднородного НЭ-37/30. Видно, что в первом случае капилляры имеют небольшую эллиптичность даже при вытяжке с сильным «подсхлопыванием» трубы-заготовки ($\varepsilon_K = 1,06$ при $\xi_K = 0,05$). Во втором случае (азимутально неоднородный НЭ) эллиптичность внутренней границы поперечных сечений вытянутых из нее капилляров была высокой, достигнув величины $\varepsilon_K = 1,24$ при $\xi_K = 0,05$, хотя исходная труба имела срав-

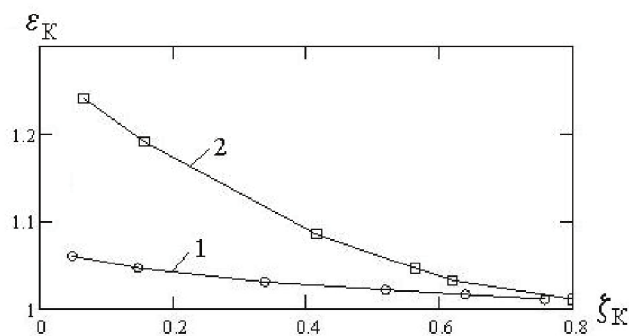


Рис. 7. Экспериментальные зависимости коэффициента эллиптичности капилляра ε_K от относительного диаметра отверстия ξ_K для капилляров, вытянутых из одной и той же трубы № 3 (OSRAM, $\delta_T = 1,04$): (1) — с помощью азимутально-однородного НЭ-37/30, (2) — с помощью азимутально-неоднородного НЭ-37/30.

нительно низкую разнотолщинность, Приведенные на рис. 7 кривые наглядно показывают насколько может увеличиться эллиптичность вытягиваемого капилляра при использовании азимутально-неоднородных нагревательных элементов.

Заключение

В результате анализа проведенных экспериментов можно сформулировать следующие утверждения:

1. При вытяжке капилляров из тонкостенных труб-заготовок с использованием ВТ-печи с азимутально-однородным температурным полем азимутальные разнотолщинности вытягиваемого капилляра и трубы-заготовки совпадают независимо от величины относительного диаметра от-

верстия капилляра. Эллиптичность вытягиваемого капилляра, напротив, зависит от величины относительного диаметра отверстия капилляра, возрастая при его уменьшении.

2. Вытяжка капилляров с использованием ВТ-печи с азимутально-неоднородным температурным полем приводит к заметной эллиптичности внутренней границы поперечного сечения даже у капилляров, вытянутых из труб-заготовок с малой разнотолщинностью.
3. Для изучения влияния на эллиптичность вытягиваемых капилляров двух одновременно действующих факторов — азимутальной неоднородности температурного поля и азимутальной разнотолщинности трубы-заготовки требуются дополнительные исследования.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

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 уретанакрилатов для УФ-отверждаемых защитных покрытий волоконных световодов. // Журнал прикладной химии, 2002, Т. 75, № 10, С. 1717–1721.
3. Прокофьева Л.П., Сахаров В.К., Щербаков В.В. Одномодовые волоконные разветвители, устойчивые к внешним воздействиям. // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова, М., 2004, Т. 2, С. 31–32.
4. Ryabko M.V., Chamorovskii Yu.K., Morshnev S.K., Starostin N.I. Optical current sensor based on microstructured optical fiber. // EOS Annual Meeting, 29-th September — 2-nd October, 2008, Paris, France, V. 4 Micro and Nanoscale Photonic Sistem. P. 89–90.
5. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., and Atkin D.M. All-silica single-mode fiber with photonic crystal cladding. // Opt. Lett., 1996, V. 21, № 19, P. 1547–1549.
6. Замятин А.А., Маковецкий А.А. Вытяжка кварцевых капилляров с подхлопыванием исходной трубы-заготовки. // Оптический журнал, 2006, Т. 73, № 8, С. 85–89.
7. Федоров В.В. Люминесцентные лампы. М.: Атомиздат, 1992, 128 с.