

УДК 532.5.032:54.03

О ВЛИЯНИИ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ГЕОМЕТРИЮ ВОЛОКНА, ВЫТЯГИВАЕМОГО ИЗ ФИЛЬЕРЫ ДВОЙНОГО ТИГЛЯ

Л.В. Шабарова¹, М.Ф. Чурбанов², Г.Е. Снопатин²

¹Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

²Институт химии высококачественных веществ РАН,
Нижний Новгород

Изучаются вопросы математического моделирования процедуры вытяжки, применяемой при получении оптических волокон. Приведены алгоритм и результаты математического моделирования вытяжки. Исследовано влияние локальных температурных возмущений на геометрию вытягиваемого двухслойного волокна. Показана принципиальная возможность управления формой волокна при помощи температурных полей, формируемых в определенных зонах нижней части фильеры двойного тигля.

Ключевые слова: оптическое волокно, математическое моделирование, граница раздела сред, вязкое течение расплава, неоднородности поля температур.

Введение

Качество оптических волокон, получаемых методом вытяжки, определяется однородностью физико-механического состава волокна и стабильностью требуемой формы его поперечного сечения. В частности, при вытягивании из круговой цилиндрической фильеры волокно должно иметь в различных поперечных сечениях форму круга постоянного радиуса. Аналогично при вытяжке волокон из фильеры двойного тигля с круговыми сечениями контейнеров сердцевинки и оболочки вытягиваемое двухслойное волокно должно в поперечном сечении иметь форму концентрических кругов и т. д.

Диагностика получаемых вытяжкой волокон показывает, что даже при строгом выдерживании осевой геометрической симметрии поперечные сечения волокон могут не обладать указанной симметрией. Форма поперечного сечения оболочки и сердцевинки в ряде физических экспериментов отлична от круговой, а смещение центра тяжести материала сердцевинки от геометрической оси симметрии достигает 20–30% радиуса оболочки. Предположительной причиной, приводящей к искажению поперечного сечения волокна, являются неоднородности поля температур в фильере. Эти неоднородности могут возникать из-за конвекции воздуха, локального непрогрева либо перегрева материалов оболочки и сердцевинки.

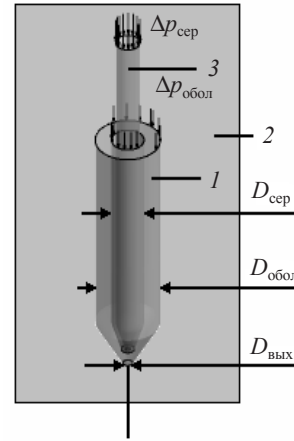
В настоящей работе развивается методология вычислительного эксперимента для исследования вытяжки многослойных волокон в полной постановке с учетом трехмерного характера течения и влияния на этот характер температурных полей

и. исследуется влияние локальных температурных неоднородностей на геометрию вытягиваемого волокна.

1. Постановка задачи

Технологическая схема получения двухслойных волокон методом вытяжки заключается в следующем (рис. 1).

Контейнер 1 с материалом оболочки помещается в температурную камеру 2. После превращения материала в расплав в контейнер оболочки погружается контейнер 3 с материалом сердцевины. На рис. 1 показано положение контейнеров по завершении этапа погружения. Фильтра, состоящая из контейнеров сердцевины и оболочки, определенное время выдерживается в температурной камере до превращения материала сердцевины в расплав. Затем на вход контейнеров подаются избыточные давления $\Delta p_{сер}$ и $\Delta p_{обол}$, величина которых поддерживается стабилизирующими устройствами, расплавы сердцевины и оболочки выходят в атмосферу, охлаждаются и затвердевают, постепенно превращаясь в гибкое двухслойное волокно. Волокно подхватывается и направляется на вращающийся с заданной угловой скоростью барабан.



Движение на барабан

Рис. 1

Теоретически процедура вытяжки представляет собой задачу о движении сплошных сред с заранее не известными границами раздела сред: «расплав сердцевины–расплав оболочки», «расплав оболочки–воздух». Физико-механические свойства сред зависят от температуры и должны определяться в процессе решения задачи.

Задача решалась в рамках модели несжимаемой вязкопластической жидкости для течения расплавов и ньютоновской жидкости для течения воздуха. Режим течения ламинарный, так как числа Рейнольдса, получаемые при скоростях расплавов и геометрии фильеры, используемой в процедуре вытяжки, имеют достаточно малый порядок (10^{-5}).

Движение расплавов и воздуха рассматривается с учетом теплопередачи посредством конвекции и теплопроводности и описывается следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\rho_i \left(\frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial t} + V_{ix} \frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial x} + V_{iy} \frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial y} + V_{iz} \frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial z} \right) = -\text{grad } p + \rho_i \mathbf{F} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu'_i \frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu'_i \frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu'_i \frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\text{div } \mathbf{V}_i = 0, \quad (2)$$

$$\rho_i c_{pi} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (V_{ix} T) + \frac{\partial}{\partial y} (V_{iy} T) + \frac{\partial}{\partial z} (V_{iz} T) \right) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi_i. \quad (3)$$

В уравнениях количества движения (1), неразрывности (2) и энергии (3) индекс $i = 1$ соответствует расплаву сердцевины, $i = 2$ – расплаву оболочки, $i = 3$ – воздуху; V_i – скорость соответствующего расплава, ρ_i – плотность, p – давление, T – температура, F – массовые силы ($F_x = F_z = 0, F_y = 9,81 \text{ м/с}^2$), μ'_i – динамическая вязкость, k_i – теплопроводность, Φ_i – скорость диссипации механической энергии в единице объема расплава в тепло (функция рассеивания),

$$\Phi_i = \mu'_i H_i^2, \quad (4)$$

где H_i – инвариант тензора скоростей деформаций,

$$H_i = \left(2 \left(\left(\frac{\partial V_{ix}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{iy}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{iz}}{\partial z} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial V_{ix}}{\partial y} + \frac{\partial V_{iy}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{ix}}{\partial z} + \frac{\partial V_{iz}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_{iy}}{\partial z} + \frac{\partial V_{iz}}{\partial y} \right)^2 \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Вязкость расплавов стекол является в общем случае нелинейной функцией скоростей деформации вида

$$\mu'_i = A_i H_i^{n_i-1}, \quad (6)$$

где A_i и n_i – параметры модели вязкопластической жидкости.

Система транспортных уравнений (1)–(3) должна решаться с соответствующими начальными и граничными условиями. Некоторые из этих условий очевидны, например, условия на входах и стенках контейнеров. Условия на границах области, в которую выходят расплавы, условия на вытягиваемых струях менее очевидны и допускают альтернативные варианты.

2. Решение задачи

Течение расплавов и воздуха исследовалось с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Идеология комплекса базируется на методе конечных объемов [1]; пакет позволяет моделировать течения их жидкостей, в том числе с границами раздела сред.

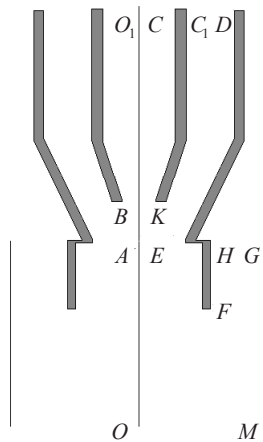


Рис. 2

Область, на которой решалась задача, имитирует фильеру двойного тигля, часть пространства в объеме кругового цилиндра, примыкающего к выходному коническому каналу фильеры (рис. 2). На данном рисунке OO_1 – ось симметрии. Размеры расчетной области и ее фрагментов заданы следующие: $AE = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $BK = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $O_1C = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $C_1D = 0,005 \text{ м}$; $HF = 0,01 \text{ м}$; $GM = 0,05 \text{ м}$; $EH = 0,001 \text{ м}$; $OO_1 = 0,09 \text{ м}$; $CC_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Геометрическая и сеточная модели строились в пакете ANSYS ICEM. При построении сеток использовалась блочная гексагональная структура. Особое внимание при построении сетки уделялось коническим каналам сердцевины и оболочки, а также зоне «луковицы» при вытяжке и предполагаемому местоположению

струи расплавов. Число узлов, используемое при проведении систематических численных расчетов, составляло примерно $3 \cdot 10^6$; максимальное число узлов при отладке задачи достигало примерно $75 \cdot 10^5$.

Моделирование проводилось для расплавов теллуридных стекол, обладающих вязкопластическими свойствами. Массовые, вязкостные и термодинамические свойства расплавов приняты согласно [2, 3], свойства воздуха взяты из [4].

В процессе отладки задачи был отработан алгоритм математического моделирования процедуры вытяжки и численного исследования влияния различных возмущений на геометрию вытягиваемого волокна. Согласно этому алгоритму, математическую процедуру вытяжки рационально проводить в два этапа.

1. На *первом этапе* моделируется течение расплавов и воздуха от начала их движения до достижения расплавами выходной границы расчетной области.

При решении задачи первого этапа массовыми силами пренебрегается. Задача решается при естественных начальных условиях по полям скоростей, избыточных давлений и температур

$$\mathbf{V}_i = 0, \quad \Delta p = 0, \quad T = T_k,$$

где T_k – температура в термокамере.

Граничными условиями задачи являются:

– условия на входах в контейнеры сердцевины O_1C и оболочки C_1D в виде

$$V_{x1} = V_{z1} = V_{x2} = V_{z2} = 0, \quad V_{y1} = Q_1/S_1, \quad V_{y2} = Q_2/S_2,$$

где Q_1, Q_2 – заданные объемные расходы расплавов, S_1, S_2 – площади поперечных сечений цилиндрической части контейнеров сердцевины и оболочки;

– условия прилипания и адиабатичности на стенках $DEHF$ и CKC_1

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 = 0, \quad \partial T / \partial n = 0;$$

– условия на выходной границе OM расчетной области

$$\Delta p = 0;$$

– условия на цилиндрической боковой GM и верхней кольцевой HG поверхностях нижнего фрагмента расчетной области

$$\Delta p = 0, \quad T = T_n,$$

где T_n – температура воздуха вдали от температурной камеры (в расчетах эта температура принималась равной комнатной).

На твердых границах постулируется обычное для классической гидромеханики условие прилипания. Случай «исчезающей» вязкости в задаче не рассматривается.

На не известных до решения задачи поверхностях раздела сред «расплав сердцевины–расплав оболочки», «расплав оболочки–воздух» ставятся граничные условия: кинематическое (условие непрерывности скоростей при переходе через границу раздела) и динамическое, состоящее в равенстве напряжений, действующих на элементарную площадку границы раздела сред. В численной реализации определение мгновенного положения границ раздела сред осуществляется методом маркеров [5].

2. На *втором этапе* моделируется собственно вытяжка волокна. Вытяжка моделируется с учетом массовых сил. Граничные условия на входах в контейнеры и на выходе из расчетной области модифицируются:

– на входах в контейнеры условия на нормальные скорости (расходы) снимаются и заменяются условиями

$$\Delta p_1 = \Delta p_{\text{сер}}, \quad \Delta p_2 = \Delta p_{\text{обол}},$$

значения избыточных давлений на входы в контейнеры сердцевины $\Delta p_{\text{сер}}$ и оболочки $\Delta p_{\text{обол}}$ принимаются равными соответствующим значениям на этих границах, полученным на первом этапе моделирования;

– на круговой части выходной границы OM , прилегающей к оси симметрии и имеющей в радиальном направлении протяженность, равную требуемому радиусу двухслойного волокна, задается значение осевой скорости (другие компоненты скорости – нулевые); первоначально значение этой скорости по абсолютной величине меньше необходимой скорости вытяжки; в процессе математического моделирования эта скорость постепенно увеличивается до значения, соответствующего требуемому радиусу вытягиваемого волокна.

Скорость вытягиваемого волокна примерно в 1500 раз больше скорости движения расплавов на входе в контейнеры. Достижение указанной скорости вытягиваемого волокна реализовывалось за 8 шагов. Моделирование процесса вытяжки занимает на 8-процессорном сервере с 32 Гб оперативной памяти порядка 20 суток. Очевидно, что при вытяжке более тонких волокон время счета будет больше. Для сокращения временных затрат рационально применить многосеточный подход. Так, при использовании двух сеточных моделей разной плотности (10^6 узлов и $3 \cdot 10^6$ узлов) время счета удалось сократить в два раза. Сетка высокого разрешения применялась только на последних пяти шагах второго этапа.

3. Результаты моделирования

На рис. 3 представлены результаты вычислительного эксперимента по вытяжке двухслойного волокна из фильеры двойного тигля. Показана геометрия поверхностей границ раздела сред между расплавами 1, расплавом оболочки и воздухом 2 (рис. 3,а), геометрия поперечного сечения вытянутого в вычислительном эксперименте волокна (рис. 3,б). Обращает на себя внимание резкое расширение струи расплава сердцевины сразу после выхода из своего канала. Это расширение объясняется относительно толстыми стенками канала. При их обтекании расплавом оболочки (внешним потоком) линии тока значительно искривляются, давление в зоне искривления падает, в результате струя сердцевины под действием своего избыточного давления резко расширяется.

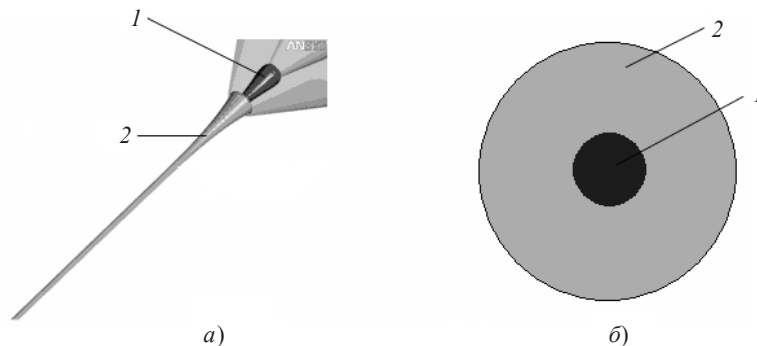


Рис. 3

В представленных результатах вычислительного эксперимента для наглядности скорость вытяжки принималась небольшой; вместе с тем по изложенному алгоритму, но в осесимметричной постановке, успешно реализовывалась математическая процедура вытяжки волокна диаметром 20 микрон.

Пространственная постановка задачи дает возможность выявить влияние локальных температурных неоднородностей на concentricность вытягиваемого волокна. Из-за существенной зависимости вязкостных свойств от температуры имеет место следующая схема: изменение температуры в локальной зоне – изменение вязкостных свойств – изменение поля скоростей – изменение формы поперечного сечения волокна. Вычислительными экспериментами установлено, что локальные температурные возмущения почти во всех зонах фильеры не влияют на форму поперечного сечения вытягиваемого волокна. Это вполне объясняется высокими диффузионными свойствами расплавов. Однако есть одна зона, неоднородности температур в которой влияют на геометрию вытягиваемого волокна. Эта зона расположена в нижней конической части, в районе выхода расплавов из фильеры.

Для иллюстрации чувствительности формы волокна на температурную неоднородность в нижней части фильеры на рис. 4 представлены результаты вычислительного эксперимента при относительно больших температурных возмущениях ($\Delta T/T_k = 12 \text{ К}/673 \text{ К} \approx 0,018$), действующих в зоне, указанной на фрагменте *a*). При этом по граничным условиям, налагаемым на скорости и давления, задача осесимметрична. Геометрия вытягиваемого волокна (*1* – расплав сердцевины, *2* – расплав оболочки), показанная на рис. 4, *б* в различных ракурсах и масштабах, форма его поперечного сечения (рис. 4, *в*) свидетельствуют о важности соблюдения температурного режима в технологических процедурах вытяжки именно в выходной части фильеры.

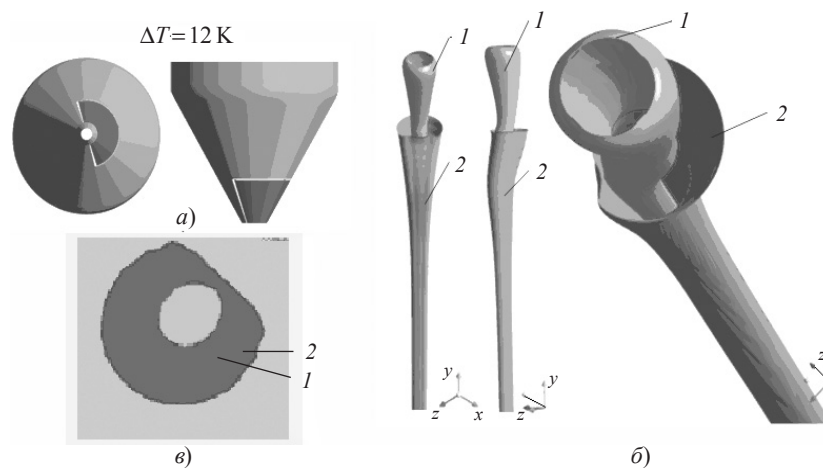


Рис. 4

4. О возможности управления формой волокна локальными температурными полями

Чувствительность геометрии вытягиваемого волокна к локальным температурным возмущениям в нижней части фильеры позволяет использовать это свойство для управления формой поперечного сечения вытягиваемого волокна.

На внешней поверхности нижней конической части фильеры создаются локальные температурные поля и проводится вытяжка. На рис. 5 представлены результаты

вычислительных экспериментов, целью которых являлось получение четырехгранных (рис. 5,а) и шестигранных (рис. 5,б) волокон вытяжкой из круговой фильеры, показанной на рис. 1. На рисунке, как и ранее, 1 – расплав сердцевинки, 2 – расплав оболочки. Получить правильные многогранники в поперечном сечении волокна пока не удастся, однако тенденции вполне просматриваются. В дальнейших вычислительных экспериментах планируется увеличить интенсивность и концентрированность локальных тепловых полей с целью более точного приближения к волокнам четырех- и шестигранной формы.

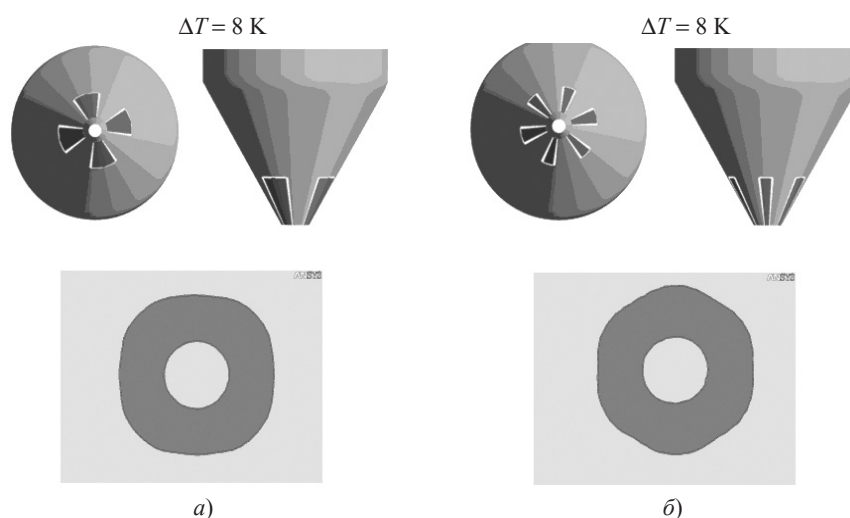


Рис. 5

Выводы

1. Разработана методика математического моделирования вытяжки двухслойных волокон с учетом пространственного характера течения сред, вязкого поведения расплавов и теплопередачи.
2. Исследовано влияние неоднородностей тепловых полей на форму поперечного сечения вытягиваемого волокна. Выявлена зона, тепловые возмущения в которой ведут к нарушению концентричности и отклонениям от требуемой формы поперечного сечения волокна.
3. Серией вычислительных экспериментов установлена возможность управления формой поперечных сечений вытягиваемых волокон при помощи концентрированных локальных температурных полей, генерируемых в определенных зонах нижней части фильеры.

Литература

1. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1, 2. / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991.
2. Вязкость по Бингаму и предельное напряжение сдвига расплава стекла $(\text{TeO}_2)_{0,78}(\text{WO}_3)_{0,22}$ / М.Ф. Чурбанов и [др.] // Неорганические материалы. – 2007. – Т. 43, №8. – С. 1–3.
3. Термодинамические свойства стекол состава $(\text{TeO}_2)_n(\text{WO}_3)_{1-n}$ в области 0–650 К / Н.Н. Смирнова и [др.] // Неорганические материалы. – 2007. – Т. 43, №10. – С. 1273–1280.
4. Сычев, В.В. Термодинамические свойства воздуха / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов. – М.: Изд-во стандартов, 1978.

5. *Harlow, F.H.* Numerical study of large amplitude free surface motion / F.H. Harlow, J.E. Welch // *Phys. Fluids.* – 1966. – 9. – P. 842–856.

[22.04.2009]

**ON THE EFFECT OF LOCAL THERMAL PERTURBATIONS ON THE GEOMETRY
OF THE FIBER DRAWN FROM THE SPINNERET OF A DOUBLE CRUCIBLE**

L.V. Shabarova, M.F. Churbanov, G.E. Snopatin

The issues of mathematically modeling the drawing procedure used in the production of optical fibers are discussed. An algorithm and the results of mathematically modeling the drawing process are given. The effect of local thermal perturbations on the geometry of the drawn two-layer fiber is studied. A general possibility is shown to control the fiber form, using temperature fields formed in appropriate zones of the lower part of the spinneret of the double crucible.

Key words: optic fiber, mathematical modeling, inter-media boundary, viscous melt flow, inhomogeneous temperature fields.