

О.Ю. Сметанников, Е.С. Михалев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АНИЗОТРОПНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Проводится сравнительный анализ полей остаточных напряжений и зависящих от них оптических характеристик анизотропных волокон трех типов: Panda, Bow-tie и с эллиптическим силовым элементом. Методом конечных элементов решается задача определения напряженно-деформированного состояния волокон при охлаждении после вытяжки. Для описания термомеханического поведения легированных стекол используются определяющие соотношения максвелловского типа. Осуществляется выбор оптимальных геометрических параметров волокон, обеспечивающих максимальный уровень поляризации при сохранении прочности и с учетом неравномерности распределения напряжений по сечению светопроводящей жилы.

Ключевые слова: анизотропные оптические волокна, поляризация, остаточные напряжения.

O.Yu. Smetannikov, E.S. Mikhalev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE OPTOMECHANICAL DESIGN PARAMETERS OF VARIOUS ANISOTROPIC OPTICAL FIBERS

Comparative analysis of the residual stress fields and their dependent optical properties is done for anisotropic fibers of three types: Panda, Bow-tie and with elliptical power element. The finite element method is used to solve the problem of determining the fibers stress-strain state during cooling after stretching. To describe the thermomechanical behavior of doped glasses used constitutive equations of Maxwell type. Held selection of the fibers optimal geometric parameters that provide maximum level of polarization while maintaining the strength and taking into account the heterogeneity of the stress distribution on the cross section of the light guide wires.

Keywords: anisotropic optical fibers, polarization, residual stresses.

1. Введение

Анизотропные оптические волокна нашли широкое применение в производстве оптоволоконных датчиков. Среди них можно выделить, например, акустические датчики, используемые в меди-

цине и при анализе образования трещин в зданиях и сооружениях [1], [2]. Одно из наиболее перспективных направлений применения анизотропных волокон – волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), измерители угловой скорости в навигационных приборах [3]. В отличие от традиционных видов связанных оптических волокон анизотропные включают дополнительные «силовые» элементы, создающие в светопроводящей жиле поля напряжений, способствующие поляризации светового луча. Основной характеристикой качества поляризации служит параметр двулучепреломления B , величина которого прямо пропорциональна разности главных напряжений в сечении жилы. Поля остаточных напряжений формируются при остывании волокна после вытяжки в результате различия термомеханических свойств его конструктивных элементов. Таким образом, для прогнозирования оптических свойств анизотропных волокон и выбора оптимального варианта их конструкции необходимо использовать методы механики деформируемого твердого тела с учетом сложной реологии свойств легированных кварцевых стекол в широком диапазоне температур. Данный подход использован, в частности, в статье [4] для исследования остаточного НДС в силовых стержнях волокна типа Panda. В данной работе на основе разработанных в [4] физической и численной моделей проводится сравнение оптических и прочностных параметров трех наиболее популярных типов анизотропных волокон с целью выявления наиболее эффективных вариантов их конструктивного исполнения.

2. Постановка краевой задачи термомеханики стеклюющихся материалов

Для прогнозирования остаточных напряжений и зависящих от них оптических характеристик анизотропного волокна необходима математическая модель термомеханических процессов, происходящих при охлаждении конструкций из легированных кварцевых стекол от температур выше температуры стеклования до температуры окружающей среды (20 °C), способная адекватно отразить поведение материала как в застеклованном или размягченном состоянии, так и в условиях переходного релаксационного процесса. Ключевой в этом вопросе является задача замыкания системы уравнений термомеханики, т.е. задача построения определяющих соотношений, непре-

рывным образом отражающих связь тензоров напряжений и деформации в широком диапазоне изменения температур.

Такая модель позволяет при проектировании смоделировать основные этапы изготовления как самого волокна, так и его конструктивных элементов.

Учитывая, что на протяжении всей технологической цепочки в заготовках и готовом волокне происходят в основном температурные деформации, которые в связи с малостью коэффициента линейного температурного расширения (ЛКТР) $\alpha \approx 10^{-7}$ невелики, была принята гипотеза малых деформаций. Известно, что релаксационные переходы (стеклование или размягчение) не сопровождаются выделением или поглощением тепла. Принимая во внимание отсутствие источников тепла в материале, малость деформаций и пренебрежимо малое диссипативное тепловыделение, можно поставить краевую задачу термомеханики о напряженно-деформированном состоянии (НДС).

Несвязанная квазистатическая краевая задача о НДС с учетом малости деформаций и несущественностью вклада массовых сил включает [8]:

Уравнения равновесия:

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} = 0, \quad x \in V, \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}(x, t)$ – тензор напряжений.

Геометрические соотношения Коши:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T), \quad x \in V, \quad (2)$$

где $u(x, t)$ – вектор перемещений, $\hat{\varepsilon}(x, t)$ – тензор полных деформаций.

Граничные условия в перемещениях:

$$u = U, \quad x \in S_u \quad (3)$$

и напряжениях

$$\hat{\sigma} \cdot n = P, \quad x \in S_\sigma, \quad (4)$$

где S_u, S_σ – части границы с заданными перемещениями и нагрузками соответственно.

Общая система уравнений задачи о напряженно-деформированном состоянии заготовки включает также определяющие соотношения [8]. Механическое поведение кварцевого стекла в широком диапазоне температур (20–2100 °C) достаточно сложно, что связано с переходом материала из стеклообразного в вязкотекучее состояние (явление размягчения и обратный процесс – стеклования) при температурах, близких к температуре размягчения T_p . Для описания механического поведения кварцевого стекла с целью адекватного отражения указанных явлений в настоящей работе были использованы определяющие соотношения максвелловского типа [5]:

$$\hat{\sigma} = {}^4\hat{C} \cdot (\hat{\epsilon} - \hat{\epsilon}_T - \hat{\epsilon}_B), \quad (5)$$

$$\hat{\epsilon}_T(x, t) = \hat{E} \int_{T_0}^T \alpha(x, T(x, t)) dT, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \hat{\epsilon}_B}{\partial t} = \frac{\hat{s}}{\eta(T)}, \quad (7)$$

$$\hat{\epsilon}_B = \int_0^t \frac{\partial \hat{\epsilon}_B}{\partial t} dt, \quad \eta(x, T) = \eta_0(x) e^{\frac{U(x)}{RT(x, t)}}, \quad (8)$$

где ${}^4\hat{C}$ – тензор четвертого ранга упругих констант застеклованного материала (изменением упругих свойств при введении малых концентраций легирующих элементов пренебрегаем); $\hat{\epsilon}_e(x, t)$ – тензор упругих деформаций, $\hat{\epsilon}_e(x, t) = \hat{\epsilon}(x, t) - \hat{\epsilon}_T(x, t) - \hat{\epsilon}_B(x, t)$; $\hat{\epsilon}(x, t)$ – тензор полных деформаций; $\hat{\epsilon}_T(x, t)$ – тензор температурных деформаций; $\hat{\epsilon}_B(x, t)$ – тензор вязких деформаций; $\eta(x, t)$, $\alpha(x, t)$ – вязкость и коэффициент температурного расширения материала, зависящие от температуры и неоднородно распределенных по объему тела легирующих примесей; T_0 – начальная температура, при которой предполагается отсутствие в теле начальных напряжений, деформаций и их производных по времени (гипотеза о естественном ненапряженном и недеформированном состоянии); $\hat{s}(x, t)$ – девиатор тензора напряже-

ний $\hat{s}(x, t) = \hat{\sigma}(x, t) - \sigma(x, t)\hat{E}$; $\sigma(x, t) = \sigma_{kk} / 3$ – среднее напряжение; $\hat{E}$ – единичный тензор второго ранга; R – универсальная газовая постоянная; $U(\mu(x))$ – энергия активации. Девиатор тензора вязкой деформации $\hat{\varepsilon}_B(x, t) = \hat{\varepsilon}_B(x, t) - \frac{1}{3}\theta_B(x, t)\hat{E}$, в силу того что в расплавленном состоянии материал предполагается несжимаемой жидкостью ($\theta_B = 0$), равен тензору вязких деформаций $\hat{\varepsilon}_B = \hat{\varepsilon}_B$; $\theta_B = \varepsilon_{Bkk}$ – объемная деформация.

Уравнения (8), (10) являются обобщением известного одномерного уравнения модели Максвелла с вязкостью, зависящей от температуры, и свойствами температурного расширения на случай сложнапряженного состояния. В случае одноосного напряженного состояния эти уравнения принимают вид

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_T - \varepsilon_B), \quad \frac{\partial \varepsilon_B}{\partial t} = \frac{\sigma}{\eta(T)}, \quad (9)$$

что соответствует дифференциальному уравнению механической модели Максвелла [6]

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{E}{\eta(T)} \sigma = E \frac{\partial (\varepsilon - \varepsilon_T)}{\partial t} \quad (10)$$

с непрерывно зависящим от температуры характерным временем релаксации $\frac{\eta(T)}{E}$.

3. Алгоритм численного решения краевой задачи термомеханики стеклующихся материалов

Для численного решения задачи теплопроводности в дальнейшем использован метод конечных элементов в традиционной реализации [7]. Численное решение задачи термомеханики (1)–(8) будем производить пошаговым методом. С этой целью введем в рассмотрение сетку на оси времени с узлами: $t_0 = 0, t_1, t_2, \dots, t_m, t_{m+1}, \dots$. Тогда можно построить дискретный по времени разностный аналог краевой задачи (1)–(8), который при осуществлении m -го шага по времени будет иметь вид

$$\operatorname{div} \hat{\sigma}^m = 0, \quad x \in V, \quad (11)$$

$$\hat{\varepsilon}^m = \frac{1}{2}(\nabla u^m + (\nabla u^m)^T), \quad x \in V, \quad (12)$$

$$u^m = U^m, \quad x \in S_u, \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}^m \cdot n = P^m, \quad x \in S_\sigma, \quad (14)$$

$$\hat{\sigma}^m = {}^4\hat{C} \cdot (\hat{\varepsilon}^m - \hat{\varepsilon}_T^m - \hat{\varepsilon}_B^m), \quad x \in V, \quad (15)$$

$$\frac{\hat{\varepsilon}_B^m - \hat{\varepsilon}_B^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} = \frac{\hat{s}^m}{\eta(x, T_m)}, \quad x \in V, \quad (16)$$

$$\hat{\varepsilon}_T^m = \hat{E} \int_{T_0}^{T_m} \alpha(x, T) dT, \quad \eta(x, T_m) = \eta_0 e^{\frac{U}{RT_m}}, \quad (17)$$

что соответствует неявной схеме отыскания неизвестных на m -м временном слое. Решение системы уравнений (11)–(17) предлагается осуществлять итерационным методом:

$$\operatorname{div} \hat{\sigma}^{m(k)} = 0, \quad x \in V, \quad (18)$$

$$\hat{\varepsilon}^{m(k)} = \frac{1}{2}(\nabla u^{m(k)} + (\nabla u^{m(k)})^T), \quad x \in V, \quad (19)$$

$$u^{m(k)} = U^m, \quad x \in S_u, \quad (20)$$

$$\hat{\sigma}^{m(k)} \cdot n = P^m, \quad x \in S_\sigma, \quad (21)$$

$$\hat{\sigma}^{m(k)} = {}^4\hat{C} \cdot (\hat{\varepsilon}^{m(k)} - \hat{\varepsilon}_T^m - \hat{\varepsilon}_B^{m(k)}), \quad x \in V, \quad (22)$$

$$\frac{\hat{\varepsilon}_B^{m(k)} - \hat{\varepsilon}_B^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} = \frac{\hat{s}^{m(k-1)}}{\eta(x, T_m)}, \quad x \in V, \quad (23)$$

$$\hat{\varepsilon}_T^m = \hat{E} \int_{T_0}^{T_m} \alpha(x, T) dT, \quad \eta(x, T_m) = \eta_0 e^{\frac{U}{RT_m}}, \quad (24)$$

где k – номер итерации при отыскании неизвестных на m -м слое, $k = 1, 2, 3, \dots$; в качестве начальных значений неизвестных для итера-

ционного процесса на m -м слое выбираются найденные значения на предыдущем $(m-1)$ -м временном слое. Начальные по времени условия для всех величин определяются из условия естественного начального ненапряженного и недеформированного состояния.

Теоретический анализ сходимости итерационного процесса не производился. Практические вычисления по описанному алгоритму подтверждают сходимость итераций.

При осуществлении каждой k -й итерации на m -м шаге по времени требуется решить краевую задачу линейной теории термоупругости, для чего удобно применять метод конечных элементов. С этой целью были использованы возможности конечно-элементного пакета ANSYS.

4. Конечно-элементная реализация

Конструктивные схемы анизотропных волокон типа Panda, Bow-tie, с эллиптическим силовым элементом изображены на рис. 1. Основной объем волокна 4 изготовлен из кварцевого стекла. Силовые стержни 1 изготовлены из кварцевого стекла с легирующими добавками, которые изменяют температуру стеклования и ЛКТР так, чтобы при охлаждении волокна после вытяжки сформировать в жиле необходимое поле напряжений, определяющее оптические характеристики волокна. Светопроводящая жила 2 и оболочка жилы 3 изготавливаются из кварцевого стекла со специализированными легирующими добавками, изменяющими коэффициент преломления света, что создает условия для полного внутреннего отражения света на границе жилы – волокно. В оболочке жилы добавки влияют также на температуру стеклования, которая должна быть меньше, чем в жиле, что позволяет оболочке при охлаждении выполнять функцию буферной прослойки, защищающей жилу от сильной неоднородности полей напряжений.

При проектировании анизотропного волокна необходимо выбрать параметры геометрии конструктивных элементов, с одной стороны, обеспечивающие в светопроводящей жиле максимальную анизотропию и однородность напряженного состояния для создания заданных оптических характеристик волокна, а с другой стороны – обеспечивающие уровень максимальных напряжений, который удовлетворяет условиям прочности кварцевого стекла в любой точке сечения волокна.

С учетом симметрии области и условий охлаждения в расчетной схеме (см. рис. 1) волокно представлено четвертью кругового цилиндра бесконечной длины с радиусом R . Положение силового стержня определяется: углом φ и радиусом стержня $r_{\text{ст}}$ для Panda (рис. 1, а); радиусами R_0, R_2 и углом φ для Bow-tie (рис. 1, б) и полуосьми a, b – для сечения с эллиптическим силовым стержнем (рис. 1, в). Силовой стержень I имеет постоянную по радиусу степень легирования $\mu(r)$ чистого кварца оксидом бора B_2O_3 . Светопроводящая жила, ограниченная радиусом r_1 , легирована 15%-ным оксидом фосфора P_2O_5 . Оболочка жилы, ограниченная радиусами r_1 и r_2 , легирована 10%-ным оксидом бора B_2O_3 .

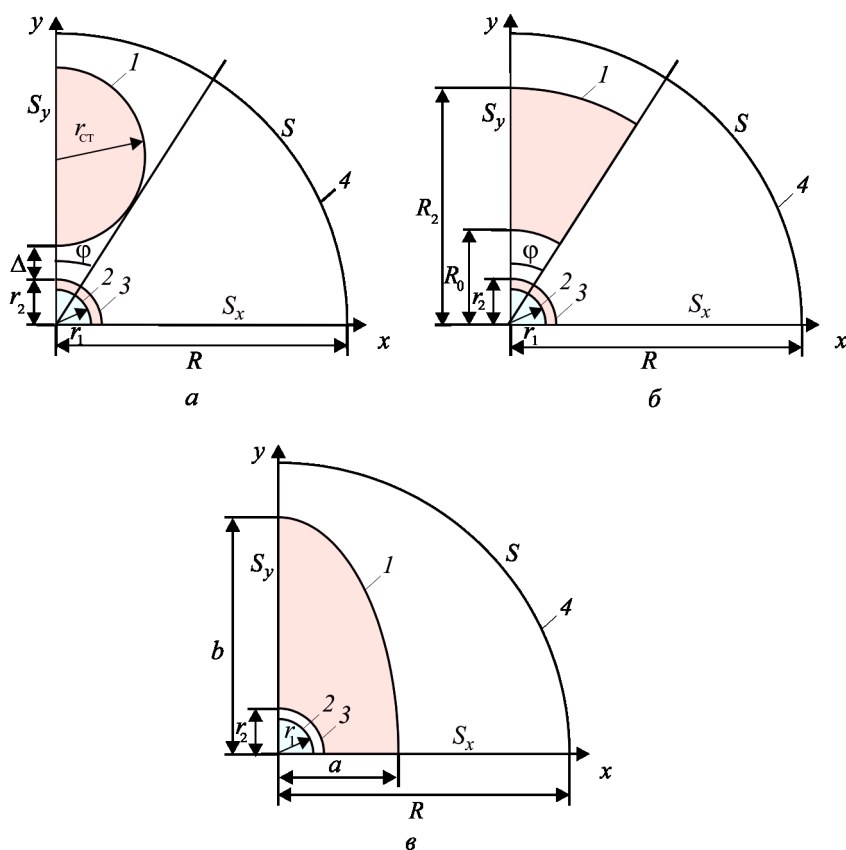


Рис. 1. Схемы четверти сечения волокон: а – Panda; б – Bow-tie; в – с эллиптическим силовым элементом

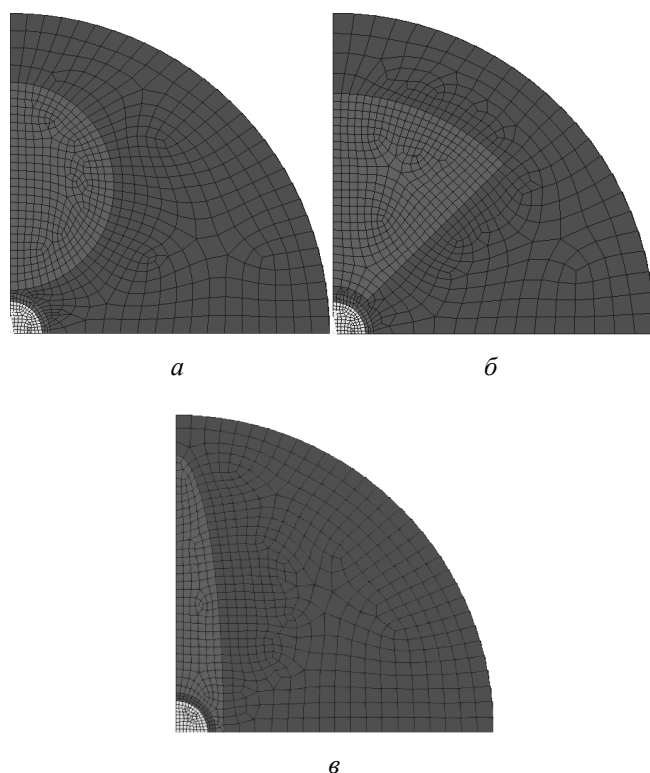


Рис. 2. Конечно-элементная дискретизация трех типов сечений:
а – Panda; *б* – Bow-tie; *в* – с эллиптическим силовым элементом

Решение поставленной механической задачи производилось средствами конечно-элементного пакета ANSYS. Для оценки сходимости решения отслеживалась зависимость невязки определения интенсивности напряжений в равномерной норме от числа элементов. Полагалось, что приемлемой является степень дискретизации, дальнейшее увеличение которой приводит к максимальному по объему относительному изменению интенсивности не более чем на 3 %. Установлено, что решение сходится при 395 элементах для Panda; 387 элементах для Bow-tie и 300 элементах для волокна с эллиптическим силовым стержнем (рис. 2, *а–в*).

Наибольшую роль в формировании полей остаточных напряжений играют модуль упругости, коэффициент Пуассона, вязкость и коэффициент линейного температурного расширения. Методика экспериментальной идентификации данных характеристик для двухкомпонентных легированных стекол подробно изложена в работах [4], [8].

5. Результаты расчета

Проведена серия численных экспериментов с целью установления качественного и количественного влияния изменения различных конструктивных параметров на характер остаточных напряжений в волокнах.

Численный анализ температурного поля в процессе охлаждения показал, что неравномерность распределения температуры по сечению в процессе остывания не превышает 10° . Поэтому температурное поле полагалось в каждый момент времени однородным, а зависимость от времени (t, c) температуры охлаждаемого волокна (T, K) задавалась полученной из численного эксперимента формулой $T = 293 + (2173 - 293)e^{-0,153t}$.

Исследовалось изменение средней разности главных напряжений $\overline{\Delta\sigma_{1-2}}$ в плоскости сечения светопроводящей жилы и максимальной по сечению интенсивности напряжений σ_i при варьировании размеров силовых стержней трех типов сечений: Panda, Bow-tie и с эллиптическим силовым элементом. Указанные параметры определялись по формулам:

$$\overline{\Delta\sigma_{1-2}} = \frac{\int_{V_g} \Delta\sigma_{1-2} dV}{V_g},$$
$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}{2}},$$

где $\Delta\sigma_{1-2}$ – абсолютная разность главных напряжений в точке сечения жилы, $\Delta\sigma_{1-2} = \sigma_1 - \sigma_2$; V_g – объем жилы; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений.

Постоянными для всех типов волокна полагались следующие размеры (см. рис. 2): $R = 40$ мкм, $r_1 = 4$ мкм, $r_2 = 5$ мкм.

Материалы: для силовых элементов и оболочки: смесь $B_2O_3 + SiO_2$ с молярной концентрацией B_2O_3 $\mu = 0,1$; для светопроводящей жилы: смесь $P_2O_5 + SiO_2$ с молярной концентрацией P_2O_5

$\mu = 0,15$; для оставшейся части волокна: смесь $P_2O_5 + SiO_2$ с молярной концентрацией $P_2O_5 \mu = 10^{-4}$.

Волокно типа Panda

Варьируется значение радиуса силового стержня r_{CT} , при разных углах наклона касательной φ (см. рис. 2, а).

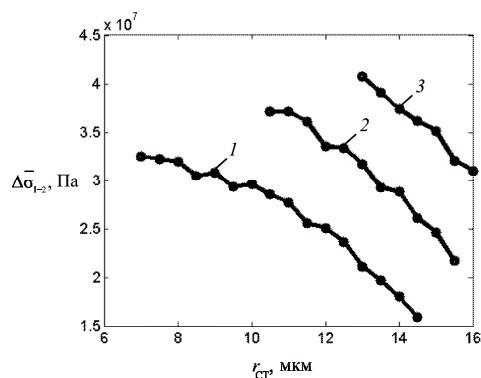


Рис. 3. Изменение средней разности главных апряжений $\Delta\bar{\sigma}_{1-2}$, при углах:
1 – $\varphi = 35^\circ$, 2 – 40° , 3 – 45°
в зависимости от радиуса r_{CT}

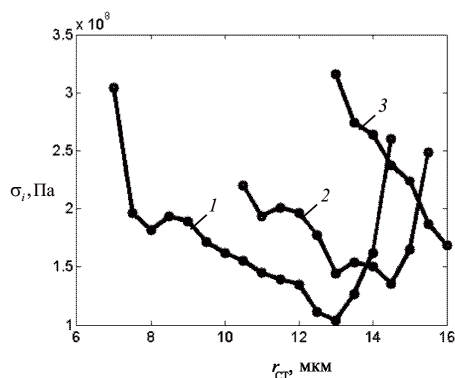


Рис. 4. Изменение максимальной интенсивности напряжения σ_i в волокне при углах:
1 – $\varphi = 35^\circ$, 2 – 40° , 3 – 45°
в зависимости от радиуса r_{CT}

Из рис. 3 видно, что наибольшая средняя разность главных напряжений $\Delta\bar{\sigma}_{1-2} = 41,6$ МПа наблюдается при $\varphi = 45^\circ$ и радиусе силового стержня $r_{CT} = 13$ мкм. Интенсивность напряжений (рис. 4) растет с увеличением φ .

Волокно типа Bow-tie

Варьируются:

1. Угол φ при разных значениях R_0 (см. рис. 2, б).

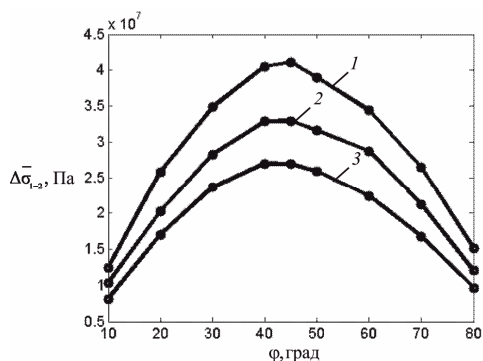


Рис. 5. Изменение средней разности главных напряжений $\Delta\bar{\sigma}_{1-2}$ при различных радиусах силового элемента R_0 и постоянном $R_2 = 30$ мкм, в зависимости от угла φ : 1 – $R_0 = 6$ мкм, 2 – 8 мкм, 3 – 10 мкм

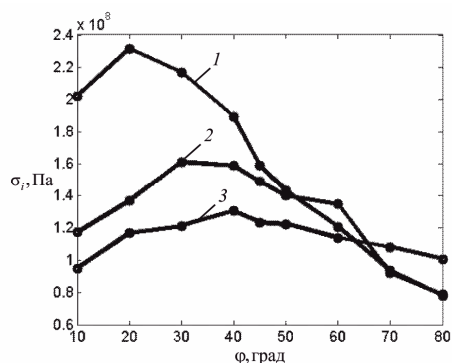


Рис. 6. Изменение максимальной интенсивности напряжения σ_i в волокне при различных радиусах силового элемента R_0 и постоянном $R_2 = 30$ мкм в зависимости от угла φ : 1 – $R_0 = 6$ мкм, 2 – 8 мкм, 3 – 10 мкм

Из рис. 5 видно, что наибольшая средняя разность главных напряжений $\Delta\bar{\sigma}_{1-2} = 40,7$ МПа получается при $R_0 = 6$ мкм, $R_2 = 30$ мкм и угле $\varphi = 45^\circ$. Интенсивность напряжений (рис. 6) с увеличением радиуса R_0 снижается.

2. Значение R_2 при угле $\varphi = 45^\circ$ (см. рис. 2, б).

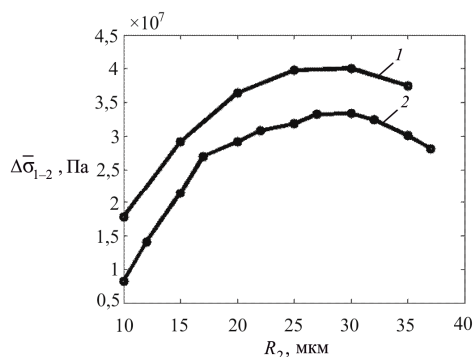


Рис. 7. Изменение средней разности главных напряжений $\Delta\bar{\sigma}_{1-2}$ при различных радиусах силового элемента R_0 и постоянном угле $\varphi = 45^\circ$, в зависимости от радиуса R_2 . 1 – $R_0 = 6$ мкм, 2 – 8 мкм

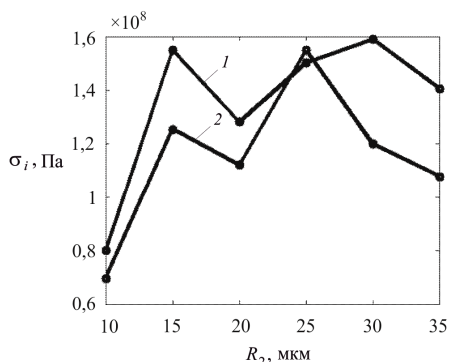


Рис. 8. Изменение максимальной интенсивности напряжения σ_i в волокне при различных радиусах силового элемента R_0 и постоянном угле $\varphi = 45^\circ$, в зависимости от радиуса R_2 . 1 – $R_0 = 6$ мкм, 2 – 8 мкм

Из рис. 7 видно, что наибольшее значение $\Delta\bar{\sigma}_{1-2} = 40,7$ МПа получается при $R_0 = 6$ мкм, $R_2 = 30$ мкм и угле $\varphi = 45^\circ$. Интенсивность напряжений (рис. 8) с увеличением радиуса R_2 снижается.

Волокно с эллиптическим силовым элементом

Для выбора оптимальных размеров силового стержня будем изменять длины полуосей эллипса a и b (см. рис. 2, в).

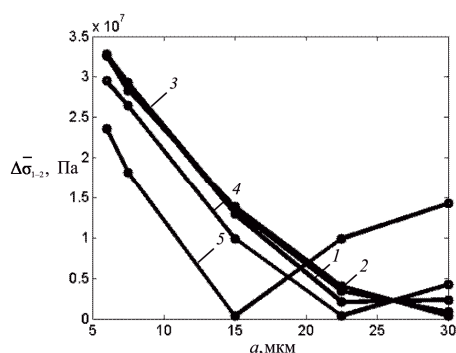


Рис. 9. Изменение средней разности главных напряжений $\Delta\bar{\sigma}_{1-2}$ при различных длинах полуоси b в зависимости от длины полуоси a :
1 – $b = 37,5$ мкм, 2 – 35 мкм,
3 – 30 мкм, 4 – $22,5$ мкм, 5 – 15 мкм

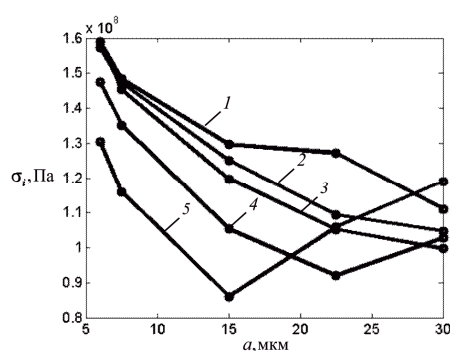


Рис. 10. Изменение максимальной интенсивности напряжения σ_i в волокне при различных длинах полуоси b в зависимости от длины полуоси a : 1 – $b = 37,5$ мкм, 2 – 35 мкм, 3 – 30 мкм, 4 – $22,5$ мкм, 5 – 15 мкм

Из рис. 9 видно, что наибольшая разность главных напряжений $\Delta\bar{\sigma}_{1-2} = 32,8$ МПа получается при $a = 6$ мкм и $b = 30$ мкм. Интенсивность напряжений (рис. 10) снижается при уменьшении полуоси a .

6. Анализ результатов и выбор оптимальных размеров

При выборе оптимального варианта конструктивного исполнения анизотропных волокон в качестве целевой функции использовалась средняя разность главных напряжений $\Delta\bar{\sigma}_{1-2}$. Исходя из этого оптимальными являются следующие варианты.

Для волокна типа Panda (см. рис. 2. а)

Размеры сечения: радиус силового стержня $r_{CT} = 13$ мкм; угол $\varphi = 45^\circ$; средняя разность напряжений в светопроводящей жиле

41,6 МПа. Поля σ_i и $\Delta\bar{\sigma}_{1-2}$ при данных параметрах показаны на рис. 11, 12 соответственно.

Величину зазора Δ при таком выборе геометрических характеристик можно определить по формуле $\Delta = r_{\text{СТ}}(\sqrt{2} - 1) - r_2$.

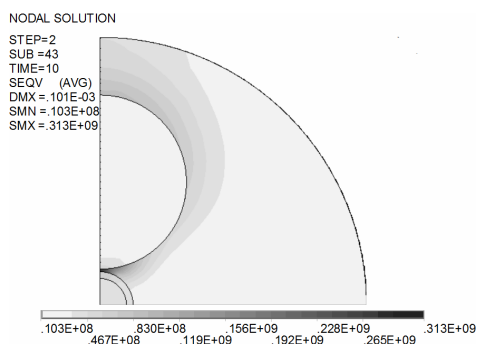


Рис. 11. Распределение интенсивности напряжений σ_i по сечению волокна

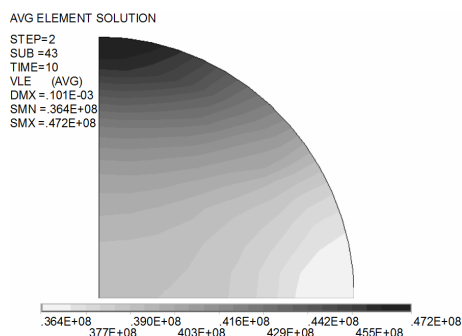


Рис. 12. Распределение разности главных напряжения $\Delta\sigma_{1-2}$ в светопроводящей жиле

Максимальная интенсивность тензора напряжений σ_i (313 МПа) формируется в зазоре между силовым стержнем и оболочкой жилы. С точки зрения качества оптических характеристик анизотропного волокна желательно, чтобы в светопроводящей жиле существовали однородные поля напряжений с максимальной разностью главных (в плоскости поперечного сечения волокна) напряжений. Для оценки степени неоднородности полей напряжений в светопроводящей жиле использован безразмерный параметр δ – относительный показатель неоднородности напряжений:

$$\delta = \left| \frac{\Delta\sigma_{1-2}^{\max} - \Delta\sigma_{1-2}^{\min}}{\Delta\sigma_{1-2}^{\text{cp}}} \right| \cdot 100 \%. \quad (25)$$

Для волокна типа Panda $\delta = 26 \%$.

Вследствие установленной неоднородности напряжений в сечении светопроводящей жилы должно возникать отклонение направлений главных осей тензора напряжений от осей координатной

системы, что может негативно сказываться на качестве оптических характеристик волокна.

Для волокна типа Bow-tie (см. рис. 2, б)

Размеры сечения: наибольший радиус силового стержня $R_2 = 30$ мкм; наименьший радиус силового стержня $R_0 = 6$ мкм; угол $\varphi = 45^\circ$. Средняя разность напряжений светопроводящей жилы 40,7 МПа. Поля σ_i и $\Delta\bar{\sigma}_{1-2}$ при данных параметрах показаны на рис. 13, 14 соответственно.

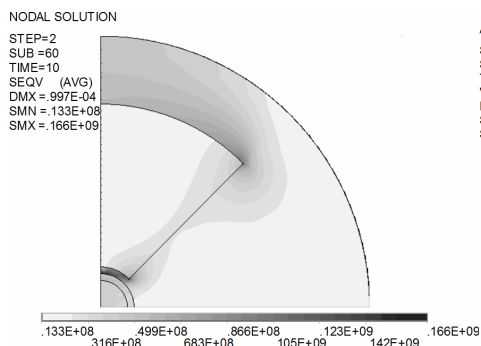


Рис. 13. Распределение интенсивности напряжений σ_i по сечению волокна

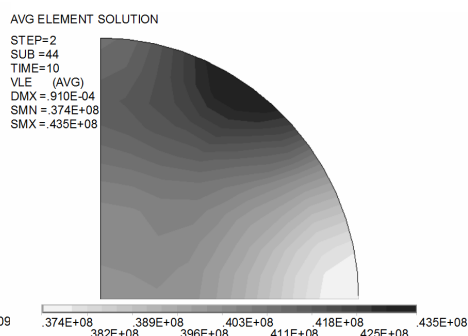


Рис. 14. Распределение разности главных напряжения $\Delta\sigma_{1-2}$ в светопроводящей жиле

Максимальная интенсивность тензора напряжений σ_i (166 МПа) формируется в зазоре между силовым стержнем и оболочкой жилы. Относительный показатель неоднородности напряжений для волокна типа Bow-tie $\delta = 15\%$.

Для волокна с эллиптическим силовым элементом (см. рис. 2, в)

Размеры сечения: наибольшее полуоснование силового стержня $b = 30$ мкм; наименьшее полуоснование силового стержня $a = 6$ мкм. Средняя разность напряжений светопроводящей жилы 32,8 МПа. Поля σ_i и $\Delta\bar{\sigma}_{1-2}$ при данных параметрах показаны на рис. 15, 16 соответственно.

Максимальная интенсивность тензора напряжений σ_i (161 МПа) формируется в зазоре между силовым стержнем и обо-

лочкой жилы. Относительный показатель неоднородности напряжений для волокна типа Bow-tie $\delta = 3,7\%$.

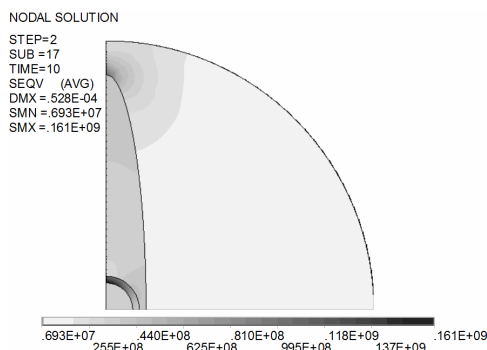


Рис. 15. Распределение интенсивности напряжений σ_i по сечению волокна

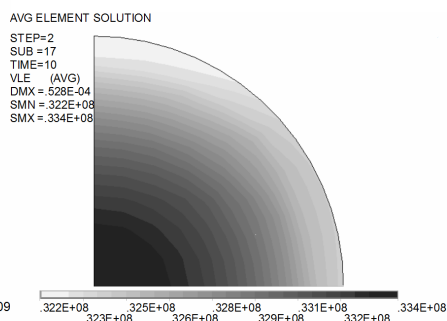


Рис. 16. Распределение разности главных напряжений $\Delta\sigma_{1-2}$ в светопроводящей жиле

Таким образом, установлено, что для достижения максимального значения средней разности главных напряжений: в волокне типа Panda должна соблюдаться следующая зависимость между варьируемыми параметрами: $\Delta = r_{CT}(\sqrt{2} - 1) - r_2$, $\varphi = 45^\circ$; в волокне с эллиптическим силовым элементом $a/b = 0,2$; в волокне типа Bow-tie: $(R_2 - R_0)/R = 0,6$, $R_0 = r_2 + 1$ мкм, $\varphi = 45^\circ$.

При этом наименее приемлемой с точки зрения прочности является конструкция волокна Panda, так как в нем, при прочих равных условиях, наблюдается максимальный уровень интенсивности остаточных напряжений $\sigma_i = 313$ МПа. Кроме того, неоднородность главных напряжений в жиле для Panda также максимальна – $\delta = 26\%$. Наименьшее качество поляризации в оптимальном варианте дает эллиптическое волокно ($\overline{\Delta\sigma_{1-2}} = 32,8$ МПа) при лучшей равномерности распределения $\delta = 3,7\%$ и относительно низком уровне максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_i = 166$ МПа. По результатам расчетов предпочтение следует отдать волокну типа Bow-tie, в котором средняя разность главных напряжений составляет 40,7 МПа, т.е. находится на одном с Panda уровне, но при этом оно

показывает большую однородность напряжений $\delta = 15\%$ и лучшие прочностные параметры $\sigma_i = 166$ МПа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-08-96036 р_урал_а.

Библиографический список

1. Combined photoacoustic and ultrasound biomicroscopy / T. Harrison, J.C. Ranasinghesagara, H. Lu, K. Mathewson, A. Walsh, R.J. Zemp // *Opt. Express*. – 2009. – № 17(24). – P. 22041–22046.
2. Sielschott H. Measurement of horizontal flow in a large scale furnace using acoustic vector tomography // *Flow Meas. Instrum.* – 1997. – № 8(3–4). – P. 191–197.
3. Armenise M.N., Ciminelli C., Dell’Olio F., Passaro V.M.N. Advances in Gyroscope Technologies // Springer. – 2010, chaps. 3–4.
4. Trufanov A.N., Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers // *Optical Fiber Technology*. – 2010. – Vol. 16, № 3. – P. 156–161.
5. Бленд Д.Р. Теория линейной вязкоупругости. – М.: Мир, 1965. – 199 с.
6. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термо-вязко-упругости. – М.: Наука, 1970. – 280 с.
7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
8. Сметанников О.Ю. Модели механического поведения материалов и конструкций в технологических процессах с терморелаксационным периодом: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2010.

References

1. Harrison T., Ranasinghesagara J.C., Lu H., Mathewson K., Walsh A., Zemp R.J. Combined photoacoustic and ultrasound biomicroscopy. *Opt. Express*, 2009, no. 17 (24), pp. 22041–22046.
2. Sielschott H. Measurement of horizontal flow in a large scale furnace using acoustic vector tomography. *Flow Meas. Instrum.*, 1997, no. 8 (3–4), pp. 191–197.

3. Armenise M.N., Ciminelli C., Dell'Olio F, Passaro V.M.N. Advances in Gyroscope Technologies, *Springer*, 2010, chaps. 3–4.

4. Trufanov A. N., Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers. *Optical Fiber Technology*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 156–161.

5. Blend D.R. Teoriya lineynoy vyazkoupругosti [Theory of linear viscoelasticity]. Moscow: Mir, 1965, 199 p.

6. Ilyushin, A.A., Pobedrya B.E. Osnovy matematicheskoy teorii termo-vyazko-upругosti [Bases of the mathematical theory thermo-viscous elasticity]. Moscow: Nauka, 1970, 280 p.

7. Segerlind L. Primeneniye metoda konechnykh elementov [Application of the finite element method]. Moscow: Mir, 1979, 392 p.

8. Smetannikov O.Yu. Modeli mekhanicheskogo povedeniya materialov i konstrukciy v tekhnologicheskikh processakh s termorelaksacionnim perekhodom [Models of mechanical behavior of materials and constructions in technological processes with thermorelaxation transition: dissertation of Doctor of Technical Sciences]. Perm, 2010, 413 p.

Получено 25.09.2013

Об авторах

Сметанников Олег Юрьевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: sou2009@mail.ru).

Михалев Евгений Сергеевич (Пермь, Россия) – студент кафедры вычислительной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: michalevzheka@mail.ru).

About the authors

Smetannikov Oleg Yur'evich (Perm, Russia) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computational Mathe-

matics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: sou2009@mail.ru).

Mikhalev Evgeniy Sergeevich (Perm, Russia) – Student, Department of Computational Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: michalewzheka@mail.ru).