

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СТЫКОВОЧНОГО МОДУЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

© 2014 г. О. Ю. Сметанников, доктор техн. наук; Г. В. Ильиных, студент

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

E-mail: sou2009@mail.ru

Решается задача термомеханики влияния температурных нагрузок на работу стыковочного модуля волоконно-оптического гироскопа. Рассматриваются различные варианты конструктивного исполнения стыковочного модуля. Численное решение проводится методом конечных элементов в пакете ANSYS. Показано, что добавление специальных вкладышей в конструкцию стыковочного модуля позволяет существенно увеличить термостабильность работы модуля.

Ключевые слова: оптоволоконный гироскоп, термомеханика, численные методы, метод конечных элементов, пигтейл, напряжения, усадка.

Коды OCIS: 060.2340 060.2400

Поступила в редакцию 13.11.2013

Волоконный оптический гироскоп (ВОГ) – это оптико-электронный прибор, измеряющий абсолютную угловую скорость вращения объекта, на котором он установлен. Принцип действия прибора основан на вихревом эффекте Саньяка, который был открыт этим ученым в 1913 г. Эффект заключается в появлении фазового сдвига двух встречно бегущих световых лучей во вращающемся кольцевом интерферометре. Разность фаз лучей пропорциональна угловой скорости вращения контура. В отсутствии вращения оптические пути обоих лучей, прошедших весь контур, будут одинаковыми. Определяемая с помощью данного эффекта угловая скорость, а также угол поворота представляют интерес для создания современных систем навигации, управления и стабилизации.

В настоящее время существует ряд трудностей при создании и эксплуатации ВОГ. Первая из них заключается в низком качестве комплектующих ВОГ, в том числе одномодового волокна, в котором возникает проблема сохранения направления поляризации. Вторая проблема возникает из-за высокой чувствительности ВОГ как к малым возмущениям внутри прибора, так и к внешним воздействиям (в работе [1] рассматривается влияние тепловых и механических нагрузок). Все это приводит к появлению паразитных дрейфов в приборе в виде “кажущейся” угловой скорости.

Помимо создания более совершенных комплектующих прибора существует иной путь решение данной проблемы. Так в работе [2] представлен подход, реализующий тарировку гироскопа, исходя из полученных в ходе натурного испытания данных о дрейфах.

Одним из источников появления дрейфов является интегрально-оптическая схема модулятора, в котором при фиксации волокна в пигтейле используются клеевые соединения. Накоплен значительный объем экспериментального материала, показывающий, что гетерогенность конструкции пигтейла приводит как к значительному снижению степени поляризации, так и к локальному разрушению.

Проведенная ранее в ОАО “Пермская научно-производственная приборостроительная компания” приближенная оценка напряженно-деформированного состояния стыковочного узла позволила выявить качественные зависимости между его геометрическими, температурными и оптическими параметрами. Используемый в данной работе подход позволяет осуществлять точный количественный анализ данной проблемы.

Решается краевая задача термомеханики о напряженно-деформированном состоянии модели стыковочного модуля ВОГ, который включает оптическое волокно типа “Panda”, вклеенное в паз пигтейла (рис. 1). Ее целью является анализ

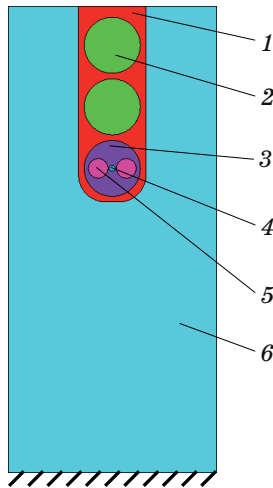


Рис. 1. Схема стыковочного модуля. 1 – эпоксидный клей, 2 – вкладыши, 3 – кварцевая основа, 4 – светопроводящая жила, 5 – нагружающие стержни, 6 – пигтейл из анизотропного упругого ниобата лития.

дополнительных напряжений, вызванных усадкой клея и неоднородными по объему конструкции температурными деформациями. Наибольший интерес представляют количественные оценки уровней температурных и усадочных напряжений в сравнении с наведенными при охлаждении волокна после вытяжки, их влияние на изменение оптических характеристик световода во время работы стыковочного модуля в различных температурных режимах. Исследуемое оптическое волокно типа “Panda” (рис. 1) состоит из светопроводящей жилы, нагружающих стержней и кварцевой основы. Нагружающие стержни выполнены из кварца, легированного оксидом бора. Кроме этого стыковочный модуль включает пигтейл, изготовленный из анизотропного упругого ниобата лития LiNbO_3 , в пазе которого размещается залитое эпоксидным клеем оптоволокно. Результаты экспериментального измерения термомеханических характеристик заготовок из LiNbO_3 предоставлены фирмой-производителем данного материала [3]. Плоскость изотропии ниобата лития ориентирована по нормали к оси x (ось x – горизонтальная в плоскости сечения, рис. 1).

Краевая задача определения напряженно-деформированного состояния пигтейла решается методом конечных элементов в пакете ANSYS Mechanical APDL. Внешние границы расчетной области (рис. 1), кроме нижней, свободны от нагрузок. С учетом соотношения продольных

и поперечных размеров конструкции принята схема обобщенного плоско-деформированного состояния в $2,5D^1$ постановке. Отсутствие источников тепла внутри модели, пренебрежимо малое диссипативное тепловыделение, а также малость геометрических размеров стыковочного модуля позволяют предположить, что температурное поле является однородным и соответствует температуре окружающей среды. Кроме того принимается гипотеза малых деформаций.

Постановка краевой задачи термомеханики включает в себя уравнение равновесия

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

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

Исходя из того, что в основном происходят температурные деформации, которые в связи с малостью температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) невелики, принимается гипотеза малых деформаций

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2} \left[\nabla \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) + (\nabla \mathbf{u}(\mathbf{x}, t))^T \right], \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2)$$

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

На части границы S_u задаются нулевые перемещения

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad \mathbf{x} \in S_u. \quad (3)$$

Механические нагрузки отсутствуют

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in S_\sigma. \quad (4)$$

Для описания механического поведения элементов конструкции из кварцевого стекла $V_q = V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5$ в условиях перехода материала из вязкотекучего состояния в стеклообразное были использованы определяющие соотношения максвелловского типа, ранее апробированные в целом ряде публикаций (см, например [4]), обобщенных в работе [5]

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}, t) = {}^4\hat{C} \cdot [\hat{\varepsilon}(\mathbf{x}, t) - \hat{\varepsilon}_T(\mathbf{x}, t) - \hat{\varepsilon}_v(\mathbf{x}, t)], \quad \mathbf{x} \in V_q, \quad (5)$$

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

¹ $2,5D$ – термин, используемый для обозначения трехмерной (3D) конечно-элементной реализации обобщенного плоско-деформированного состояния, при которой в третьем направлении (обычно это координата Z) имеется один слой элементов равной толщины, а на соответствующей узловой плоскости задается условие равенства перемещений U_z .

$$\frac{\partial \hat{\epsilon}_v(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \frac{\hat{s}}{\eta(T)}, \quad \mathbf{x} \in V_q, \quad (7)$$

$$\hat{\epsilon}_v(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \frac{\partial \hat{\epsilon}_v(\mathbf{x}, t)}{\partial t} dt, \quad \mathbf{x} \in V_q, \quad (8)$$

$$\eta(\mathbf{x}, T) = \eta_0(\mathbf{x}) \exp[U(\mu(\mathbf{x})) / RT(\mathbf{x}, t)], \quad \mathbf{x} \in V_q, \quad (9)$$

где ${}^4\hat{C}$ – тензор четвертого ранга упругих констант застеклованного материала, $\hat{\epsilon}_e(\mathbf{x}, t) = \hat{\epsilon}(\mathbf{x}, t) - \hat{\epsilon}_T(\mathbf{x}, t) - \hat{\epsilon}_v(\mathbf{x}, t)$ – тензор упругих деформаций, $\hat{\epsilon}(\mathbf{x}, t)$ – тензор полных деформаций, $\hat{\epsilon}_T(\mathbf{x}, t)$ – тензор температурных деформаций, $\hat{\epsilon}_v(\mathbf{x}, t)$ – тензор вязких деформаций, $\eta(\mathbf{x}, T)$, $\alpha(\mathbf{x}, T)$ – вязкость и ТКЛР материала, зависящие от температуры и неоднородно распределенных по объему тела легирующих примесей, T_0 – начальная температура естественного состояния, $\hat{s}(\mathbf{x}, t) = \hat{\sigma}(\mathbf{x}, t) - \sigma(\mathbf{x}, t)\hat{E}$ – девиатор тензора напряжений, $\sigma(\mathbf{x}, t) = \sigma_{kk}/3$ – среднее напряжение, \hat{E} – единичный тензор второго ранга, R – универсальная газовая постоянная, $U(\mu(\mathbf{x}))$ – энергия активации. Девиатор тензора вязкой деформации $\hat{\epsilon}_v(\mathbf{x}, t) = \hat{\epsilon}_v(\mathbf{x}, t) - \theta_v(\mathbf{x}, t)\hat{E}/3$ в силу того, что в расплавленном состоянии материал предполагается несжимаемой жидкостью ($\theta_v = 0$), равен тензору вязких деформаций $\hat{\epsilon}_v = \hat{\epsilon}_v$, $\theta_v = \epsilon_{vkk}$ – объемная деформация.

Механическое поведение эпоксидного клея V_1 полагается линейно-вязкоупругим с учетом гипотезы о наличии температурно-временной аналогии по модели Вильямса–Ланделла–Ферри. Материальные константы определялись из данных экспериментов, предоставленных изготовителем.

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}, t) = \int_0^t {}^4\hat{R}(t' - \tau') \cdot d[\hat{\epsilon}(\mathbf{x}, \tau) - \hat{\epsilon}_T(\mathbf{x}, \tau)], \quad \mathbf{x} \in V_1, \quad (10)$$

$$t' = \int_0^t \frac{d\omega}{a_T(T(\mathbf{x}, \omega), T_f)}, \quad \mathbf{x} \in V_1, \quad (11)$$

$$\hat{\epsilon}_T(\mathbf{x}, t) = \hat{\alpha}(T(\mathbf{x}, t) - T_0), \quad \mathbf{x} \in V_1, \quad (12)$$

где ${}^4\hat{R}$ – ядро релаксации, в качестве которого взята сумма экспонент, $t' = t/\alpha_T$ – приведенное время релаксации, T_f – температура, при которой происходит сдвиг, $\hat{\alpha}$ – тензор коэффициентов температурного расширения, a_T – коэффициент температурно-временного сдвига по модели Вильямса–Ланделла–Ферри.

Ниобат лития представляет собой анизотропный упругий материал. Для описания его поведения (V_6) используется закон Гука

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}, t) = {}^4\hat{C} \cdot [\hat{\epsilon}_e(\mathbf{x}, t) - \hat{\epsilon}_T(\mathbf{x}, t)], \quad \mathbf{x} \in V_6, \quad (13)$$

$$\hat{\epsilon}_T(\mathbf{x}, t) = \hat{\alpha}(T(\mathbf{x}, t) - T_0), \quad \mathbf{x} \in V_6, \quad (14)$$

где ${}^4\hat{C}$ – тензор четвертого ранга упругих констант, $\hat{\epsilon}_e(\mathbf{x}, t) = \hat{\epsilon}(\mathbf{x}, t) - \hat{\epsilon}_T(\mathbf{x}, t)$ – тензор упругих деформаций, $\hat{\epsilon}(\mathbf{x}, t)$ – тензор полных деформаций, $\hat{\epsilon}_T(\mathbf{x}, t)$ – тензор температурных деформаций.

Для численного решения задачи термомеханики (1)–(14) применен метод конечных элементов. В качестве элемента для 2,5D постановки был использован 20-узловой трехмерный элемент с квадратичной аппроксимацией. Расчет проводился в несколько этапов, начиная с предварительной стадии охлаждения свободного волокна после вытяжки от температуры 1800 до 20 °С. При этом для элементов клея и пигтейла включалась опция “умерщвления” EKILL. После этого указанные элементы “оживлялись” и моделировался цикл нагрев–охлаждение–нагрев с постоянной скоростью, включающий начальную усадку клея.

Получены результаты при трех углах поворота ψ линии, соединяющей оси нагружающих стержней, и для каждого из углов исследовано по 2 варианта конструктивного исполнения (ВКИ) стыковочного узла. ВКИ1 – с П-образным пазом, ВКИ2 – с установленными в верхнем слое клея частично замещающими его вкладышами из обрезков волокна (2 на рис. 1). Второй вариант, как показал расчет, способствует снижению уровня дополнительных температурных напряжений за счет приближения среднего ТКЛР клеевой прослойки к ТКЛР волокна при сохранении площади адгезии между клеем и пигтейлом. Во всех случаях моделировались 4 этапа температурного нагружения: I – усадка, II – нагрев, III – охлаждение, IV – повторный нагрев.

Как видно из рис. 2 (кривая 1), при ВКИ1 в первоначальном процессе усадки клеевой прослойки (стадия I) наблюдается падение разности главных напряжений (РГН) и, следовательно, степени поляризации луча. Последующий нагрев (стадия II) приводит к ее росту, а охлаждение (стадия III) – к снижению с небольшим гистерезисом, обусловленным вязкоупругими свойствами клея. При температуре порядка –10 °С наблюдается повторный рост

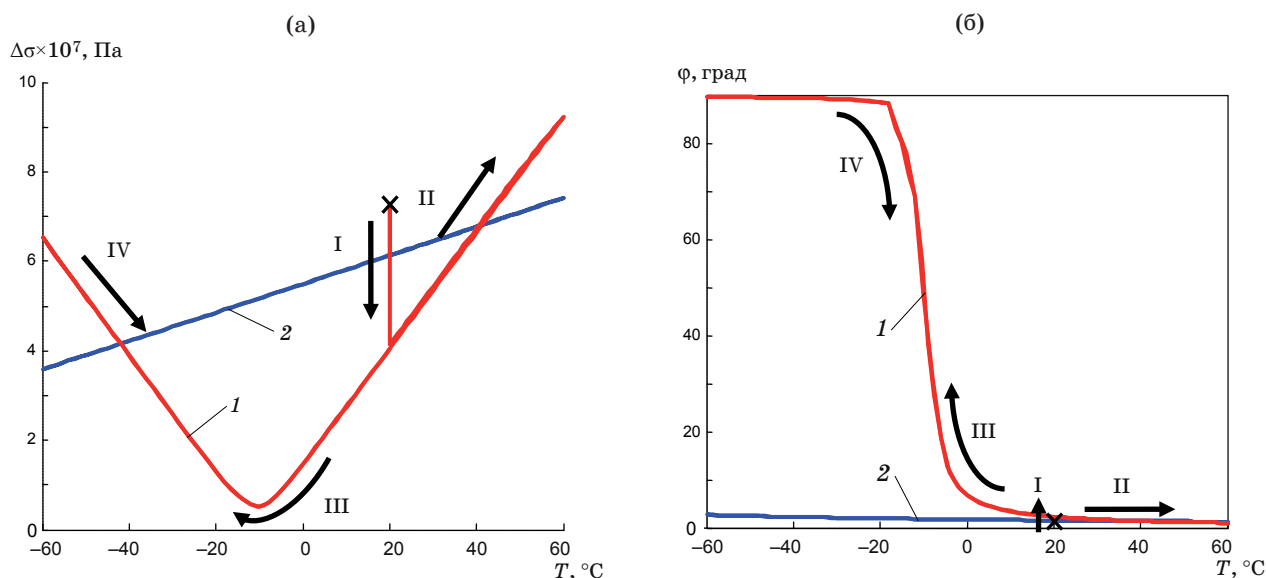


Рис. 2. Температурная зависимость при $\psi = 0$ средней РГН в световоде (а) и среднего угла поворота оси первого главного напряжения (б). I – усадка, II – нагрев, III – охлаждение, IV – повторный нагрев – этапы температурного нагружения. 1 – ВКИ1, 2 – ВКИ2.

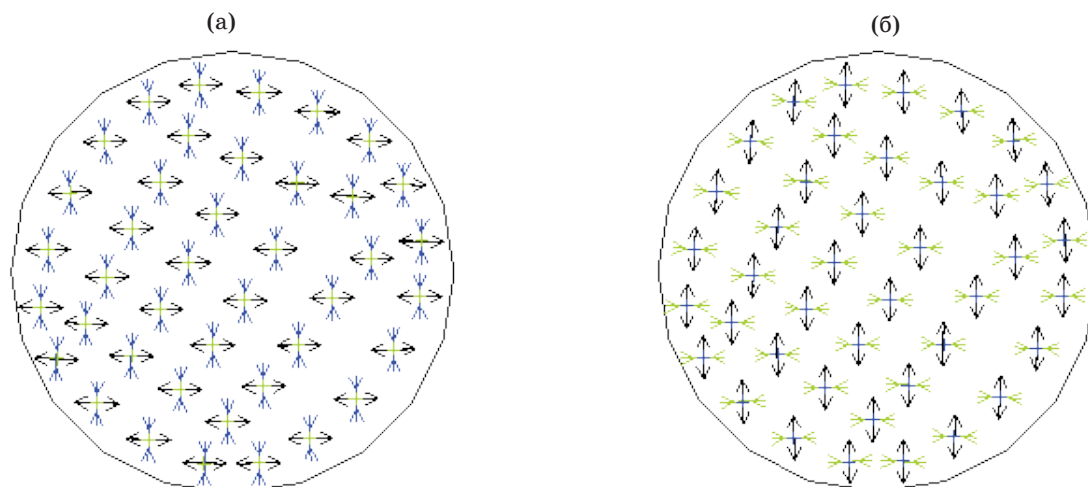


Рис. 3. Ориентация осей главных напряжений при температурах 60°C (а) и -60°C (б).

РГН, связанный со сменой местами первого и второго главных напряжений. Это подтверждается сменой угла поляризации на 90° (стадия III на рис. 2б). При повторном нагреве (стадия IV) наблюдается обратный процесс.

Ключевую роль в смене ориентации оси поляризации играют два фактора: анизотропия ниобата лития (ТКРЛ по горизонтали – $1,5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, по вертикали – $7,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), а также неравномерность толщины клеевой прослойки по образующей волокна. В горизонтальном направлении толщина прослойки меньше, чем в вертикальном. Поэтому при изменении температуры средний уровень дополнительных вертикальных растягивающих

напряжений, вызванных разницей в ТКРЛ клея ($\alpha = 97 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и волокна, будет выше. Таким образом, совместное влияние данных факторов на анизотропию напряженного состояния в светопроводящей жиле приводит к смене ориентации оси поляризации.

На рис. 3. приведены изображения ориентации осей главных напряжений в плоскости световода на границах заданного диапазона температур. Из рисунка видно, что действительно осуществляется поворот осей на 90° , при этом из-за изменения знака происходит перераспределение главных напряжений.

Максимальный нагрев до температуры 60°C приводит к состоянию, в котором волокно

подвергается вертикальному сжатию и горизонтальному растяжению, это связано с тем, что ТКЛР у эпоксидного клея значительно больше, чем у оптического волокна, в основу которого входит кварц. При этом малое содержание клея между стенками паза и волокном позволяет расширяться волокну в горизонтальном направлении. На рис. 3. не представлена количественная картина РГН, данные о ее значениях в тех же точках приведены на рис. 4.

При $\psi = 45^\circ$ характерно значительное увеличение угла поляризации в процессе усадки (стадия I на рис. 5б). При этом изменение угла

присутствует и в случае ВКИ2 (кривая 2 на рис. 5б). Нагрев (стадия II) приводит к незначительному падению РГН, однако угол поворота главных напряжений изменяется более чем на 20° . При последующем охлаждении (стадия III), начиная с 20°C , наблюдается значительное увеличение РГН, этому этапу также характерно сильное изменение угла поляризации.

При $\psi = 90^\circ$ изменение угла поляризации незначительно на всех стадиях температурного нагружения, включая стадию усадки. РГН на стадиях нагрев–охлаждение–нагрев (стадии I, II, III на рис. 6а) изменяется по линейному

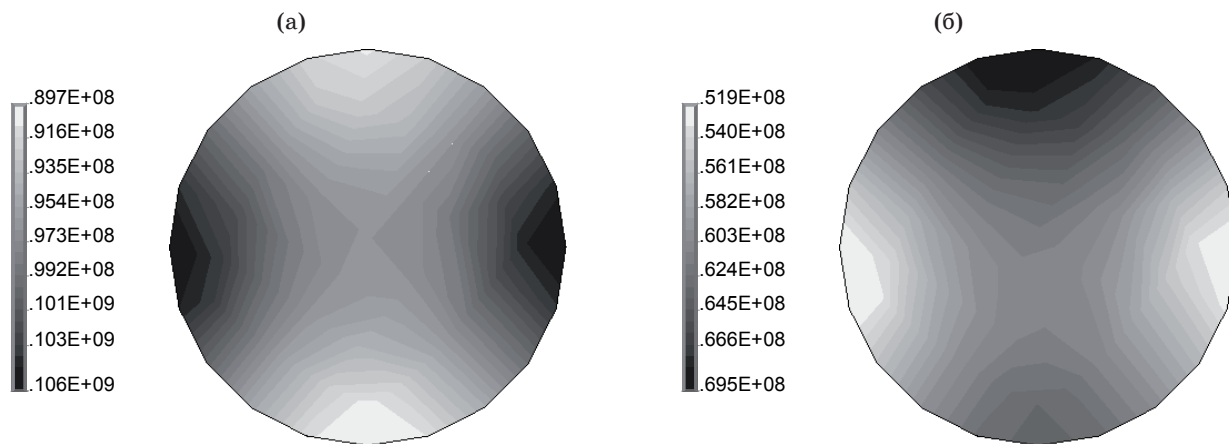


Рис. 4. РГН при температурах 60 (а) и -60°C (б).

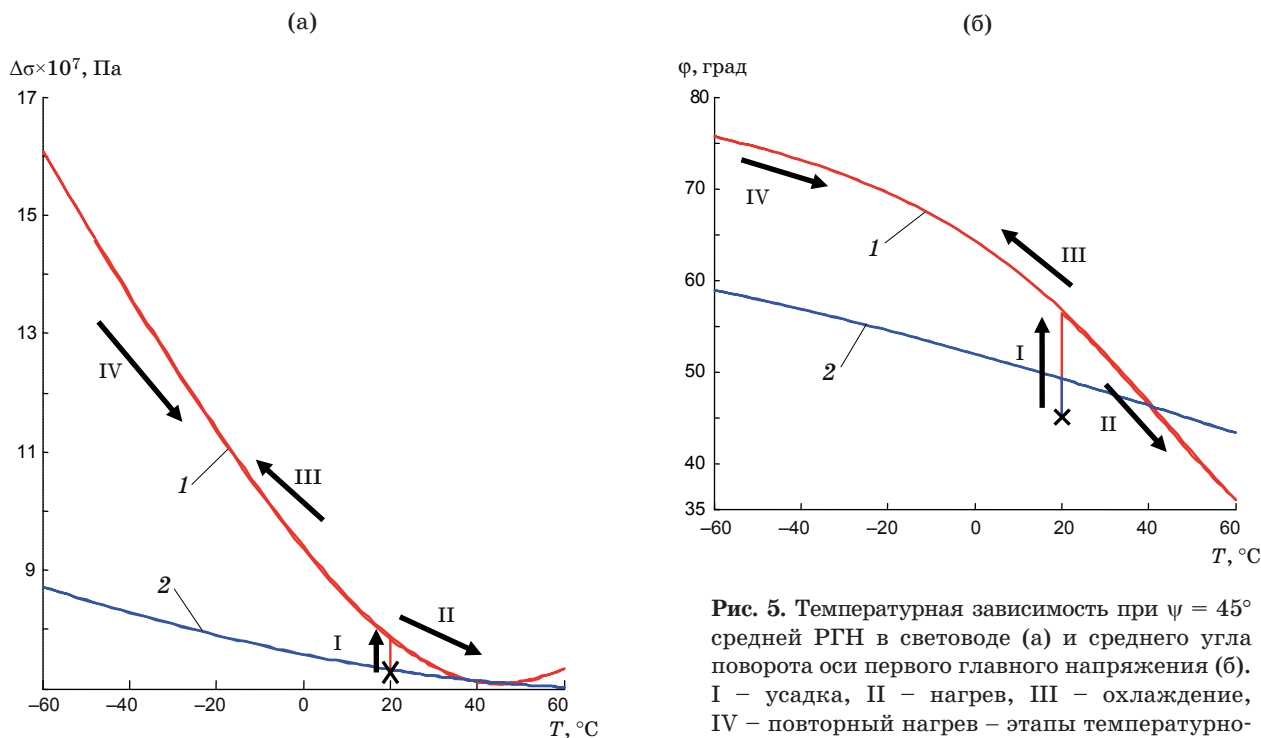


Рис. 5. Температурная зависимость при $\psi = 45^\circ$ средней РГН в световоде (а) и среднего угла поворота оси первого главного напряжения (б). I – усадка, II – нагрев, III – охлаждение, IV – повторный нагрев – этапы температурного нагружения. 1 – ВКИ1, 2 – ВКИ2.

закону с максимумом в точке $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минимумом в $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для ВКИ2 во всех трех случаях (кривые 2 на рис. 2, 5, 6) характерно существенное уменьшение амплитуды температурных колебаний и как степени, так и направления поляризации.

Таким образом, проведенный анализ показал значительный рост термостабильности стыковочного узла при использовании дополнительных кварцевых вкладышей.

Относительное отклонение РГН от начальной вычисляется по формуле $\Delta\hat{\sigma}_E = (\Delta\sigma_E - \Delta\sigma_F) / \Delta\sigma_F \times 100\%$, где $\Delta\sigma_E$, $\Delta\sigma_F$ – соответственно, экстремальное значение средней по светопроводящей жиле РГН и значение

РГН в начальном состоянии (свободное волокно при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Полученные значения относительных отклонений приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что при усадке эпоксидного клея изменение РГН имеет меньшее значение при ВКИ2, нежели в обычном конструктивном исполнении ВКИ1 при всех вариантах угла наклона оси. Следовательно, с точки зрения чувствительности конструкции к температурным нагрузкам при усадке предпочтительной является ВКИ2. При нагреве результаты аналогичны при углах $\psi = 0$ и 90° . При $\psi = 45^{\circ}$ ВКИ1 вызывает меньшее отклонение РГН, однако и в случае ВКИ1, и в случае ВКИ2 значения отклонения невелики. При ох-

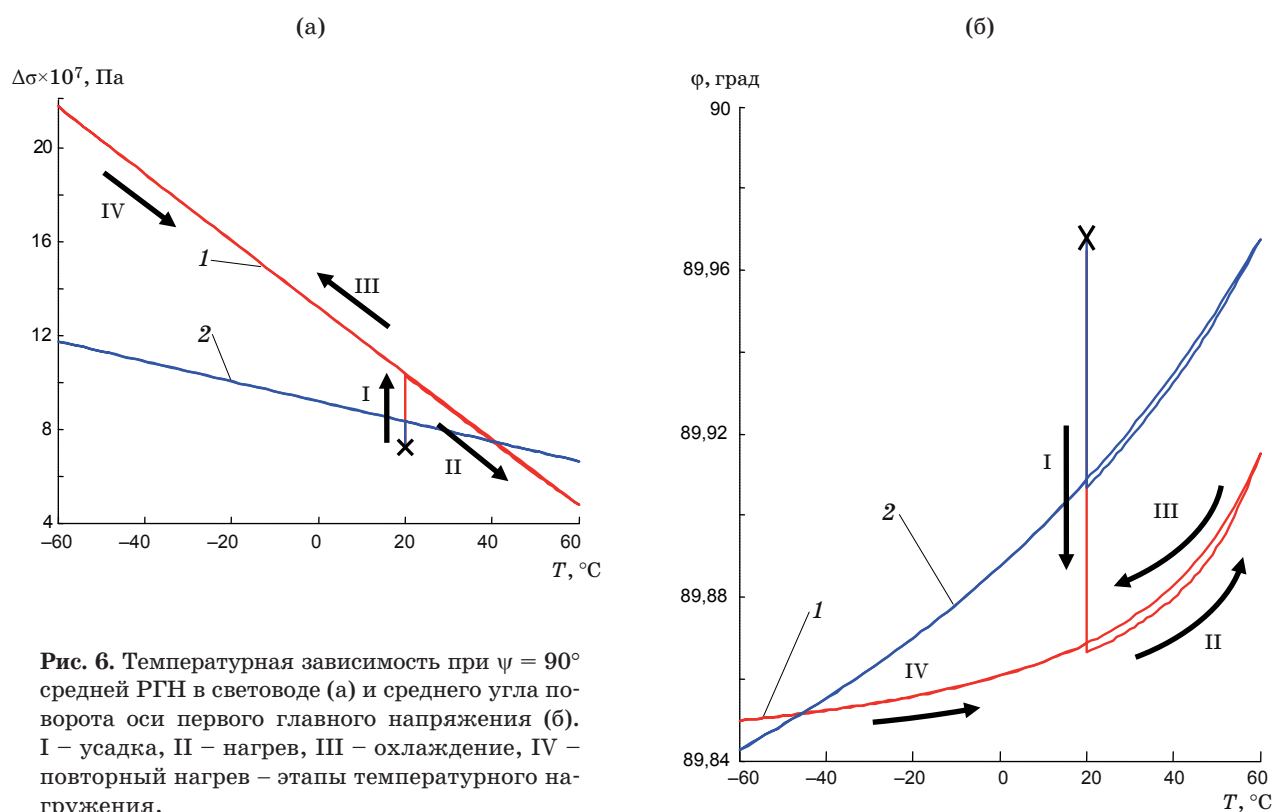


Рис. 6. Температурная зависимость при $\psi = 90^{\circ}$ средней РГН в световоде (а) и среднего угла поворота оси первого главного напряжения (б). I – усадка, II – нагрев, III – охлаждение, IV – повторный нагрев – этапы температурного нагружения.

Таблица 1. Относительные отклонения РГН (%) от начального значения

ψ , град	Вариант конструкции	Отклонение при усадке	Максимальное отклонение при нагреве	Максимальное отклонение при охлаждении	Суммарное отклонение
0	ВКИ1	-43,0	27,1	-92,8	162,9
	ВКИ2	-15,6	2,1	-50,6	68,3
45	ВКИ1	8,1	1,3	121,9	131,3
	ВКИ2	0,9	-3,2	20,1	24,2
90	ВКИ1	41,7	-34,4	199,7	275,9
	ВКИ2	14,8	-8,6	61,8	85,2

Таблица 2. Абсолютные отклонения углов наклона главных осей (град) от начального положения

ψ , град	Вариант конструкции	Отклонение при усадке	Максимальное отклонение при нагреве	Максимальное отклонение при охлаждении
0	ВКИ1	0,96	-0,29	88,24
	ВКИ2	0,22	-0,03	1,37
45	ВКИ1	11,46	-8,96	30,69
	ВКИ2	4,26	-1,68	13,94
90	ВКИ1	-0,10	-0,05	-0,11
	ВКИ2	-0,06	0,00	-0,12

лаждении конструкции наблюдаются максимальные изменения РГН. При этом использование ВКИ2 позволяет снизить этот эффект для всех вариантов наклона оси оптического волокна. Суммарное отклонение позволяет оценить общую степень отклонения РГН в рабочем диапазоне с учетом усадки клея.

Абсолютное отклонение углов наклона главных осей от начального определяется из соотношения $\Delta\varphi = \varphi_T - \varphi_R$. Полученные значения абсолютных отклонений приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что с точки зрения поляризации сигнала использование конструкции с горизонтально-ориентированным оптическим волокном недопустимо из-за поворота осей главных напряжений в случае охлаждения почти на 90. Однако использование ВКИ2 в этом случае позволяет избавиться от существенно-го поворота направления поляризации. Также

наблюдается снижение данного параметра в процессах усадки и нагрева. В случае наклона оси оптического волокна на 45° и для ВКИ1, и для ВКИ2 наблюдается значительный поворот осей главных напряжений от начального положения. Самым благоприятным вариантом является вертикально-ориентированное волокно, в котором отклонения достигают минимальных значений.

Сопоставляя данные о степени поляризации и данные о ее направлении можно сделать вывод о существовании ограничений на ориентацию оптического волокна. Для стабильной работы волокна в случае ВКИ1 необходимо его установить вертикально в пигтейле. ВКИ2 позволяет помимо вертикально-ориентированного волокна также использовать горизонтальное положение, которое позволяет снизить степень отклонения РГН от начального значения.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Галягин К.С., Ивонин А.С., Савин М.А. Дрейф волоконно-оптического гироскопа // Сб. науч. тр. Sworld по материалам междунар. научно-практ. конф. 2012. Т. 1. № 3. С. 34–42.
2. Галягин К.С., Ошивалов М.А., Вахрамеев Е.И., Ивонин А.С. Расчетный прогноз теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Вестник пермского национального исследовательского университета. Аэрокосмическая техника. 2012. № 32. С. 127–140.
3. Lithium Niobate, optical crystals // GOOCHANDHOUSEGO.COM. URL: <http://www.goochandhousego.com/products/technical-info-ln/LNmatProperties.pdf> (Дата обращения: 09.02.2014).
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. V. 16. № 3. P. 156–161.
5. Сметанников О.Ю. Модели механического поведения материалов и конструкций в технологических процессах с терморелаксационным переходом // дисс. доктора техн. наук. Пермь, 2010. 413 с.