

УДК 681.787

*Т.Н. Бабенко, А.Ю. Голяева, П.Ю. Лобанов,
И.С. Мануйлович, О.Е. Сидорюк*

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ОПТИЧЕСКОГО СИТАЛЛА ПОСРЕДСТВОМ ЛАЗЕРНОЙ ФАЗОСДВИГАЮЩЕЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*T.N. Babenko, A.Yu. Golyaeva, P.Yu. Lobanov,
I.S. Manuylovich, O.E. Sidoryuk*

M.F. Stelmakh «Polus» Research and Development Institute
3, build. 1 Vedenskogo St., Moscow, 117342, Russia.

QUALITY EVALUATION FOR OPTICAL GLASS-CERAMICS PARTS USING LASER PHASE-SHIFTING INTERFEROMETRY

Статья посвящена уточнению критериев контроля свильности оптических ситаллов, введению для них количественных характеристик качества с помощью методик фазосдвигающей интерферометрии, включающих построение карт локальных искажений волнового фронта в объеме материала.

ФАЗОСДВИГАЮЩАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, СВИЛИ, СИТАЛЛ, ИСКАЖЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА.

The article is devoted to refinement of the criteria of striae control of optical glass-ceramics, introduction of quantitative characteristics through the use of phase-shifting interferometry techniques with the construction of local wavefront distortion maps in the material volume.

PHASE-SHIFTING INTERFEROMETRY, STRIAE, GLASS-CERAMICS, WAVEFRONT DISTORTION.

В различных прецизионных приборах стеклокерамика с низкими значениями температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) нашла широкое применение в качестве конструкционного материала (для базовых блоков крупногабаритной оптики, литографии, корпусов оптических резонаторов, интерферометров и т. п.). Чем более жесткие требования потребители предъявляют к используемым композитам, тем выше оказывается роль операций контроля их физико-химических характеристик. Поскольку современные технологии производства не позволяют обеспечивать выпуск ситаллов с полным отсутствием свиелей (нитевидных и ленточных флуктуаций показателя преломления), актуальна задача разработки методик оперативных и достоверных измерений однородности материала, выбора критериев годности отдельных заготовок для произ-

водства тех или иных деталей.

Целью исследований настоящей работы являлось уточнение критериев контроля свильности оптических ситаллов, введение в него количественных характеристик посредством использования методик фазосдвигающей интерферометрии с построением карт локальных искажений волнового фронта в объеме материала. Анализу подвергались детали конструкций резонаторов лазерных гироскопов [1], изготовленные из серийного ситалла марки СО-115М. Образцы представляли собой диски с плоскопараллельными полированными гранями.

В настоящее время, несмотря на долгую историю исследований качества оптических материалов, не существует, к сожалению, единой системы классификации свиелей и общепринятой методики их контроля. Известны несколько довольно распространенных подходов анализа однородности

материалов, отраженных в существующих национальных и международных стандартах [2–7]. Сами принципы их построения (в основном, с использованием тенеграфических методик [8, 9]) не подвергаются критике в современных исследованиях. Разногласия возникают в вопросах детерминации экспериментальных условий, при определении оптимальных параметров измерительных установок, на путях перехода от качественных оценок к количественным характеристикам, при верификации методик калибровки полученных результатов.

В стандартизованных методиках [2–7] логика контроля не ставит на первый план точное измерение локальных искажений волнового фронта и сравнение полученных значений с какой-либо принятой шкалой. Инструментами для количественных оценок в тенеграфических исследованиях устанавливаются наборы контрольных образцов сравнения (с предельно допустимыми дефектами), которые предназначены для определения пороговых уровней искажений волнового фронта, границ, характерных для соответствующих классов при сертификации оптических материалов по свильности.

В частности, у образцов сравнения, обязательных для контроля согласно ГОСТам [2, 4], разность хода, вносимая в волновой плоский фронт искусственной свилью первой категории, составляет 50 нм, а свилью второй – 100 нм [10]. В стандарте [7] установлен единственный ориентир – свили с соответствующим искажением величиной 30 нм. А наиболее детальная шкала указана в документе [3]: 10, 15, 30 и 60 нм.

Естественно, отсутствие единой методики и общепринятой шкалы качества оптических материалов с точки зрения свильности затрудняет сопоставление результатов разных исследователей и принятие адекватного решения в производимых оценках. Более того, особенности самих процедур испытаний могут быть причиной разногласий в их итогах [10].

Как наиболее плодотворное может, видимо, рассматриваться простое решение существующей проблемы: переход на прямой метод интерферометрического контроля ло-

кальных неоднородностей оптического материала. Если с его помощью производится метрологическая аттестация образцов сравнения, применяемых для определения границ в различных классификациях качества материала, то в ряде случаев целесообразно отказаться от применения теневых методов и набора контрольных образцов (промежуточного и лишнего звена). Конечно, речь не идет о крупногабаритных заготовках или предварительном грубом контроле. Это рационально, в первую очередь, для анализа относительно тонких деталей с плоскопараллельными полированными гранями.

Таким образом могут быть достигнуты единство измерений и однозначность оценок качества оптических материалов. По результатам испытаний, без дополнительных процедур, оценка свили может быть определена набором численных параметров: локальным искажением волнового фронта (или его удельным значением, нормированным на единицу длины хода лучей в образце), ее геометрическими размерами, максимальным градиентом показателя преломления и т. п.

Поэтому в настоящей работе для анализа деталей из ситалла марки СО-115М, получения количественных характеристик их свильности использовалась методика фазосдвигающей интерферометрии [11] с построением карт локальных искажений волнового фронта в объеме материала. Отдельные результаты сопоставлялись с данными, полученными тенеграфическим методом.

Все исследованные образцы были изготовлены из ситалла, прошедшего еще на стадии заготовок предварительный отбор по двулучепреломлению материала [12] (т. е. более грубый контроль согласно [13]). Готовые детали, подлежащие контролю на свильность, не обнаруживали двулучепреломления.

Экспериментальная установка для контроля свильности материала оптических деталей

В наших исследованиях использовалась установка на основе фазосдвигающего лазерного интерферометра Физо фирмы Zygo. Ее ключевые элементы представлены

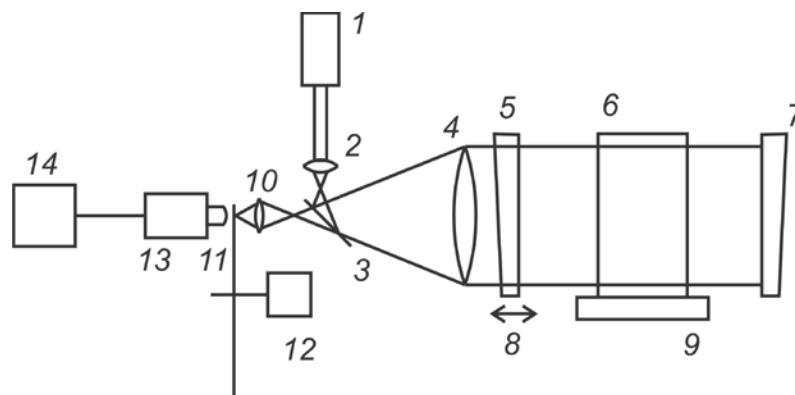


Рис. 1. Принципиальная схема контроля объемных свилей посредством лазерного интерферометра Физо:

- 1 – He-Ne лазер; 2, 4 – линзы коллиматора; 3 – светоделительная пластина; 5 – опорная пластина; 6 – исследуемый образец; 7 – возвратное зеркало; 8 – пьезодвигатель; 9 – держатель образца; 10 – объектив; 11 – экран; 12 – двигатель; 13 – цифровая видеокамера; 14 – компьютер с монитором

на схеме, приведенной на рис.1.

Луч гелий-неонового лазера 1 с помощью коллиматора на базе линз 2, 4 и полупрозрачного зеркала 3 преобразуется в параллельный пучок света, проходящий через пластины 5 и 7, плоские грани которых, обращенные друг к другу, установлены параллельно и обеспечивают условия интерференции отраженных от них волн. Изображение интерференционной картины с помощью линзы 4 и объектива 10 формируется на экране 11, который представляет собой шлифованную поверхность оптического стекла и обеспечивает регистрацию проецируемого изображения с обратной стороны посредством цифровой видеокамеры 13, сопряженной с компьютером 14. Пластина экрана 11 выполнена в форме плоского диска и установлена на валу двигателя 12, приводящего ее во вращение, для усреднения во времени получаемой картины и повышения качества интерферограмм.

Для пластин 5 и 7 характерна небольшая клиновидность, обеспечивающая выведение из интерференционных процессов нежелательного влияния нерабочих поверхностей. В пространстве между опорными пластинами располагается исследуемый образец 6 с целью выявления вносимых им искажений плоского волнового фронта. Образец крепится на держателе 9, позво-

ляющем производить регулировку наклона образца в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Образец представляет собой пластину с полированными плоскопараллельными гранями.

Пластина 5 интерферометра Физо установлена на пьезоэлектрическом актуаторе, позволяющем производить управляемые микроперемещения опорной пластины для выполнения фазовой развертки, в ходе которой специальная компьютерная программа выполняет анализ цифровых изображений интерферограмм, непрерывно регистрируемых видеокамерой.

Итогом измерительного процесса является построение для исследуемого образца карты локальных искажений волнового фронта, обусловленных оптической неоднородностью объема материала.

Перед процедурой контроля свильности производилось измерение плоскостности каждой из поверхностей исследуемых деталей на той же установке, однако образец в этом случае располагался на месте задней пластины 7, заменяя ее. Задняя поверхность при этом смачивалась иммерсионной жидкостью для устранения ее влияния. Небольшие фазовые сдвиги, связанные с отклонением профиля поверхностей от идеальной плоскости, принимались во внимание в ходе анализа искажений волнового фронта излучения, проходящего через образцы.

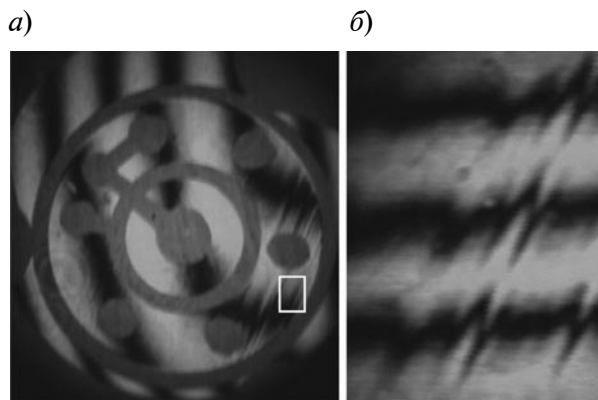


Рис. 2. Интерферограммы с локальными искажениями, обусловленными наличием свилей в объеме ситалла: *a* – общий вид; *б* – фрагмент общей картины (обозначен прямоугольным контуром) с увеличением в 10 раз. В качестве образца – деталь в виде диска с отверстиями (элемент датчика лазерного гироскопа)

Результаты исследований свилей в деталях из ситалла СО-115М

На рис. 2 представлены примеры интерферограмм с локальными искажениями, которые обусловлены наличием свилей в объеме материала. Образцом служил один из элементов датчика лазерного гироскопа, изготовленного из серийного ситалла марки СО-115М, – диск блока электродов. Диаметр дисковой детали составлял 45 мм, толщина – 7 мм. Рис. 2, *a* отражает общую картину, в то время как рис. 2, *б* –

увеличенную область с наблюдаемыми неоднородностями. По сравнению с результатами традиционных тенеграфических исследований (рис. 3, *a*) метод фазосдвигающей интерферометрии дает наглядные преимущества в чувствительности контроля. Количественные характеристики обнаруживаемых свилей на том же участке образца (при оптимальном его наклоне) после выполнения всех компьютерных процедур обработки данных отражает карта локальных искажений плоского волнового фронта (рис. 3, *б*) и их презентация в 3D-формате (рис. 3, *в*).

В измерительной установке излучение дважды проходит исследуемый образец. Но для определенности в характеристике материала все представленные результаты пересчитаны на один проход. Таким образом, в рассматриваемой области отдельные нитевидные свилю вносят искажения Δ от 15 до 60 нм. В пересчете на единицу длины это соответствует величинам от 21 до 86 нм/см.

Из полученных данных математическими методами без труда можно определять значения крутизны локальных искажений, параметры их пространственной периодичности в потоке свилей и другие характеристики.

Например, для свилюного участка рассматриваемой детали (см. рис. 3, *б* или рис. 3, *в*) на рис. 4, *a* представлен график искажений волнового фронта, построенный

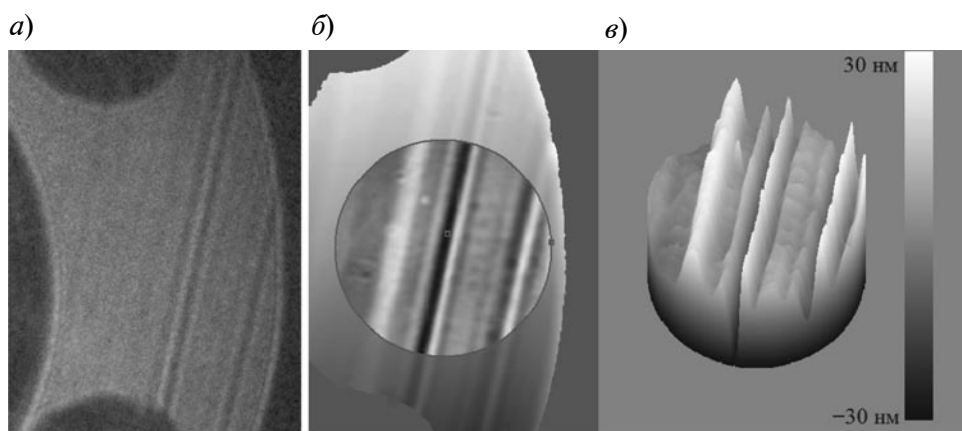


Рис. 3. Результаты исследования свилюности в образцах ситалла марки СО-115М тенеграфическим методом (*a*) и посредством фазосдвигающей интерферометрии с построением карты локальных искажений волнового фронта в 2D-(*б*) и 3D-(*в*) форматах

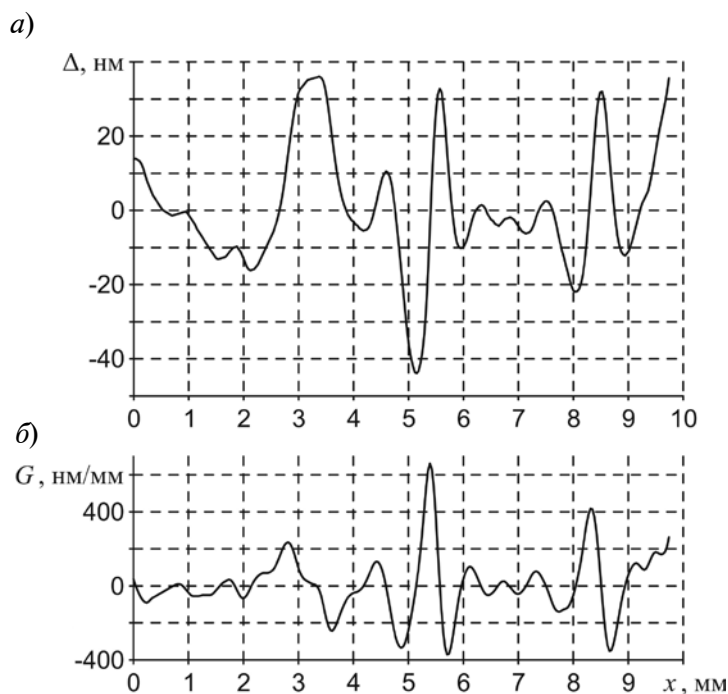


Рис. 4. График искажений волнового фронта (а) и распределение градиента волнового фронта (б), построенные для одной и той же области образца – вдоль направления, перпендикулярного потоку свилей

вдоль направления, перпендикулярного потоку свилей. При этом классификацию и контроль свилей можно провести по градиенту волнового фронта G (рис. 4, б), который показывает резкость изменения длины оптического пути. Ясно, что получить аналогичные характеристики с использованием тенеграфических методов невозможно.

Наличие численных характеристик дает основу для введения более объективных критериев отбора качественных изделий. Не исключено, что открываемый этим путь к сбору дополнительной информации о качестве материала в условиях производства

деталей прецизионных приборов может оказаться основой для установления не обнаруженных до этого взаимосвязей тонких физических процессов.

Концептуальное отсутствие образцов сравнения при использовании предлагаемой методики существенно упрощает процесс контроля и интерпретацию его результатов.

Оперативность контроля и полная компьютеризация процесса позволяет использовать методику в условиях промышленного производства, массового выпуска изделий с деталями из оптического ситалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азарова, В.В. Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии [Текст] / В.В. Азарова, Ю.Д. Голяев, В.Г. Дмитриев. // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – № 2. – С. 96–104.
2. ГОСТ 3521-81. Стекло оптическое. Метод определения бессвильности [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 7 с.
3. Striae in optical glass [Text]: Optical glasses. Schott Technical information. TIE-25. – 2006. – 20 p.

4. ГОСТ 23136-93. Материалы оптические. Параметры [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 24 с.
5. Military specification, glass, optical [Text]. – MIL-G-174B. U.S. Dept. of Defense, 1986. – 16 p.
6. American national standard for optics and electro-optical instruments – optical glass [Text]: ANSI/OEOSC OP3.001-2001. – 2008. – 27 p.
7. Optics and optical instruments. Preparation of drawings for optical elements and systems [Text]:

Part 4. Material imperfections – Inhomogeneity and striae; International standard ISO 10110-4. –1997. – 12 p.

8. **Васильев, Л.А.** Теневые методы [Текст] / Л.А. Васильев. – М.: Наука, 1968. – 402 с.

9. **Stroud, J.S.** Striae quality grades for optical glass [Text] / J.S. Stroud // Optical Engineering. – 2003. – Vol. 42. – № 6. – P. 1618 – 1624.

10. **Доладугина, В.С.** Оценка свильности в оптических стеклах [Текст] / В.С. Доладугина // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71. – № 12.

– С. 41 – 47.

11. **Greivenkamp, J.E.** Phase shifting interferometry in optical shop testing [Text] / J.E. Greivenkamp, J.H. Bruning; 2nd ed., ed. Malacara D. – New York: Wiley, 1992. – 420 p.

12. **ГОСТ 3519-91.** Материалы оптические. Методы определения двулучепреломления [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 17 с.

13. Optical properties of zerodur [Text]: Advanced optics. Schott Technical information. TIE-43. – 2007. – 12 p.

REFERENCES

1. **Azarova V. V., Golyaev Yu. D., Dmitriev V. G.** Ring gas lasers with magneto-optical control for laser gyroscope (invited paper). Quantum Electron, 2000, vol.30 (2), pp. 96–104. (rus)

2. Optical glass. Method for determination of instrie. GOST 3521-81. Moscow, Publishing House of Standards, 1998. 7 p. (rus)

3. Striae in optical glass Optical glasses. Schott Technical information. TIE-25. 2006. 20 p.

4. Optical materials. Parameters. GOST 23136-93. Moscow, Publishing House of Standards, 1995. 24 p. (rus)

5. Military specification, glass, optical ; MIL-G-174B. U.S. Dept. of Defense, 1986. 16 p. Defense, 1986. – 16 p.

6. American national standard for optics and electro-optical instruments - optical glass: ANSI/OEOSC OP3.001-2001; 2008. 27 p.

7. Optics and optical instruments. Preparation of drawings for optical elements and systems. Part 4.

Material imperfections – Inhomogeneity and striae; International standard ISO 10110-4. 1997. 12 p.

8. **Vasiliev L.A.** Schlieren Methods. Moscow, Nauka, 1968. 402 p. (rus)

9. **Stroud J.S.** Striae quality grades for optical glass. Optical Engineering. 2003, vol. 42, № 6, pp. 1618–1624.

10. **Doladugina V.S.** Evaluating the stria content in optical glasses. Journal of Optical Technology, 2004, vol. 71, (12), pp. 836-841.

11. **Greivenkamp J.E.** Phase shifting interferometry in optical shop testing; 2nd ed., ed. Malacara D. New York: Wiley, 1992. 420 p.

12. Optical materials. Methods for determination of birefringence. GOST 3519-91. Moscow, Publishing House of Standards, 1992. 17 p. (rus)

13. Optical properties of zerodur [Text]: Advanced optics. Schott Technical information. TIE-43, 2007, 12 p.

БАБЕНКО Татьяна Николаевна – студентка Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», инженер ОАО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха.

117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, к. 1

ГОЛЯЕВА Анастасия Юрьевна – аспирантка ОАО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха.

117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, к. 1

ЛОБАНОВ Петр Юрьевич – ведущий инженер ОАО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха.

117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, к. 1

МАНУЙЛОВИЧ Иван Сергеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ОАО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха.

117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, к. 1

СИДОРЮК Олег Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории ОАО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха.

117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, к. 1

O.E.Sidoryuk@gmail.com