

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-107-115

УДК 681.7.066.3 + 681.7.066.2 + 681.7.062 + 681.7.026.6 + 681.7.03 + 681.7.067 + 681.7.028

Опыт применения технологии прецизионного реплицирования для восстановления оптических деталей из брака при серийном производстве

Анатолий Васильевич Лукин^{1✉}, Никита Андреевич Гурин²,
Андрей Николаевич Мельников³, Елена Галимулловна Лисова⁴,
Алиса Александровна Свистунова⁵

^{1, 3, 4}Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики»,
Казань, Россия

^{2, 5}Новосибирский приборостроительный завод, Новосибирск, Россия

¹gipo@telebit.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>

²gna200694@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9760-7316>

³gipo@telebit.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3318-9853>

⁴gipo@telebit.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3609-3336>

⁵alisasvistunova17@gmail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4990-2761>

Аннотация

Предмет исследования. Возможность применения технологии прецизионного реплицирования асферических поверхностей при серийном и массовом производстве оптических деталей — восстановление линз и зеркал из брака по форме рабочей поверхности, а также по классу чистоты и параметрам шероховатости. **Цель работы** — информировать руководителей и технологов оптических предприятий об уникальных реставрационных возможностях этой технологии. **Метод.** Опытно-экспериментальный метод восстановления из брака оптических элементов по форме асферической поверхности с использованием технологии прецизионного реплицирования (т.е. изготовление комбинированных оптических элементов с одной реплицированной асферической поверхностью). Проведены комплексные испытания восстановленных образцов стеклянных линз с нанесенным соответствующим просветляющим покрытием, в ходе которых экспериментально измерены модули оптической передаточной функции оптических приборов с этими линзами. **Основные результаты.** Восстановлена из брака по форме асферики опытная партия образцов двояковыпуклой стеклянной линзы с одной реплицированной асферической поверхностью для окуляра серийно выпускаемого изделия. Проведен интерферометрический контроль восстановленных образцов в интерферометре типа Тваймана–Грина с синтезированным голограммным оптическим элементом-компенсатором. По полученным результатам для дальнейших исследований отображены три наилучших образца. Представлены результаты комплексных испытаний одного из них, в том числе результаты измерений модуля оптической передаточной функции окуляра, собранного с применением этого образца. **Практическая значимость.** При серийном и массовом производстве объективов и окуляров различного назначения неизбежно появление заметной доли оптических деталей (линз и зеркал), забракованных по качеству их рабочих поверхностей (среднеквадратичное отклонение, класс чистоты и уровень шероховатости). Реализация предложенной технологии открывает реальную возможность восстановления значительной части таких деталей.

Ключевые слова: прецизионное реплицирование, асферическая оптика, брак по качеству оптической поверхности, восстановление оптической поверхности, лазерно-голографический интерферометр, синтезированный голограммный оптический элемент-компенсатор, оптическое производство, объективы и окуляры различного назначения

Ссылка для цитирования: Лукин А.В., Гурин Н.А., Мельников А.Н., Лисова Е.Г., Свистунова А.А. Опыт применения технологии прецизионного реплицирования для восстановления оптических деталей из брака при серийном производстве // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 7. С. 107–115. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-107-115>

Коды OCIS: 240.6700, 160.5470, 220.3630, 230.4040, 220.1250, 090.2880, 090.2890, 220.4610, 220.4840, 120.4820, 120.4630

Experimental use of precision replication technology to recover optical parts from rejects in batch production

ANATOLY V. LUKIN¹✉, NIKITA A. GURIN², ANDREI N. MELNIKOV³,
ELENA G. LISOVA⁴, ALISA A. SVISTUNOVA⁵

^{1, 3, 4}Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

^{2, 5}Novosibirsk Instrument-Building Plant, Novosibirsk, Russia

¹gipo@telebit.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>

²gna200694@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9760-7316>

³gipo@telebit.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3318-9853>

⁴gipo@telebit.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3609-3336>

⁵alisasvistunova17@gmail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4990-2761>

Abstract

Subject of study. The article considers the possibility of using the technology of precision replication of aspherical surfaces in batch and mass production of optical parts in order to recover defective lenses and mirrors, namely to correct working surface defects such as shape, surface finish class, and roughness parameters. **The aim of study** is to inform the managers and technologists of optical enterprises about the unique restoration abilities of this technology. **Method.** An experimental method has been implemented to restore optical elements from rejects according to the shape of the aspherical surface using precision replication technology (*i.e.* the manufacture of combined optical elements with one replicated aspherical surface). Several samples of a glass lens were restored, to which an appropriate antireflection coating was applied. Comprehensive tests of restored optical parts with the antireflection coating were carried out. Using them, the moduli of the optical transfer function of optical devices were experimentally measured. **Main results.** A trial batch of biconvex glass lenses with a single replicated aspherical surface intended for a commercial product eyepiece has been recovered from rejects discarded due to aspherical surface shape defects. An interferometric testing of the recovered samples has been conducted using a Twyman–Green interferometer with a computer-generated holographic optical compensator element. Based on the results obtained, three best samples were selected for further testing. The results of comprehensive tests of one of them are presented in the paper, including measurement results of the optical transfer function modulus of an eyepiece assembled using this sample. **Practical relevance.** During batch and mass production of objectives and eyepieces of various purposes, a noticeable number of optical parts (lenses and mirrors) inevitably gets rejected by quality department due to their working surface defects (root-mean-square deviation, surface finish class, and roughness level). Implementing the suggested technology opens up a viable opportunity to recover a substantial amount of such parts.

Keywords: precision replication, aspherical optics, optical surface quality defects, optical surface recovery, laser-holographic interferometer, computer-generated holographic optical compensator element, optical production, objectives and eyepieces of various purposes

For citation: Lukin A.V., Gurin N.A., Melnikov A.N., Lisova E.G., Svistunova A.A. Experimental use of precision replication technology to recover optical parts from rejects in batch production [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 7. P. 107–115. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-107-115>

OCIS codes: 240.6700, 160.5470, 220.3630, 230.4040, 220.1250, 090.2880, 090.2890, 220.4610, 220.4840, 120.4820, 120.4630

ВВЕДЕНИЕ

Научно-технологическое направление по разработке производительных технологий формообразования оптических асферических поверхностей (АП) путем прецизионного реплицирования АП как «пионерское» в стране было начато в Государственном институте прикладной оптики (НПО ГИПО) в начале 1960-х гг. [1]. С высокоточных асферических мастер-матриц производится «отпечаток» АП в относительно тонком полимерном слое на стеклянную подложку с последующим интерферометрическим контролем на основе использования осевых синтезированных голограмм в качестве оптических образцов или компенсаторов. Тем самым был открыт путь для кардинального решения одного из комплексов проблем оптического производства — производительного формообразования и высокоточного контроля асферической оптики [1–3].

В данной работе рассматривается нетрадиционное применение формообразования АП путем прецизионного реплицирования [1–3] при серийном и массовом производстве — восстановление оптических деталей из брака по форме рабочей поверхности, классу чистоты и параметрам шероховатости.

Цель работы заключается в информировании руководителей и технологов оптических предприятий об уникальных реставрационных возможностях технологии прецизионного реплицирования.

ОБОСНОВАНИЕ РЕАЛИЗУЕМОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО РЕСТАВРАЦИОННОГО МЕТОДА

К предпосылкам положительного решения задачи реставрации оптических деталей (асферических линз и зеркал) из брака по форме рабочей поверхности, классу чистоты и параметрам шероховатости следует отнести следующие:

1. Возможность обеспечения заданных значений основных оптических параметров рабо-

чей АП мастер-матрицы (среднеквадратического отклонения (СКО) поверхности от расчетного значения, класса чистоты и параметров шероховатости); при этом ранее нами было установлено, что по этим параметрам при соблюдении требований технологической чистоты к воздушной среде в помещении и применяемым материалам реплицированные АП идентичны рабочей поверхности использованной мастер-матрицы [2].

2. Оптимизация выбора формы заготовки (это может быть ближайшая «вершинная» тонкошлифованная сферическая поверхность, ближайшая «трехточечная» тонкошлифованная сферическая поверхность или асферизованная тонкошлифованная поверхность).

3. Оптимизация выбора типа полимеризующейся композиции, в том числе с минимизированным коэффициентом ее усадки при учете результатов выбора исходной формы рабочей поверхности заготовки [1–3].

В качестве практического примера в рамках предложенного технического решения по применению технологии прецизионного реплицирования далее приводятся результаты экспериментальной работы по восстановлению из брака по форме АП нескольких образцов стеклянной линзы, входящей в состав окуляра, работающего в видимом диапазоне спектра.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В целях восстановления из брака по форме АП стеклянной линзы световым диаметром 39 мм и фокусным расстоянием 39,3 мм (на средней длине волны 550 нм) в НПО ГИПО

— спроектирована, изготовлена и аттестована мастер-матрица с заданной рабочей АП (рис. 1);

— рассчитаны и изготовлены два осевых синтезированных голограммных оптических элемента-компенсатора (СГОЭ-компенсатора),



Рис. 1. Мастер-матрица и три реплицированные асферические линзы

Fig. 1. Master detail and three replicated aspherical lenses

один из которых предназначен для технологического и аттестационного контроля рабочей АП мастер-матрицы, другой — линзы с реплицированной АП [4–6];

– на измерительном стенде собраны две контрольные схемы лазерно-голографического интерферометра типа Тваймана–Грина (для контроля рабочей АП мастер-матрицы в отраженном свете и для контроля линзы с реплицированной АП в проходящем свете) [4, 5];

– проведен входной контроль забракованных по асферизации линз из партии (10 шт.), переданной из Новосибирского приборостроительного завода (НПЗ) в НПО ГИПО для их восстановления методом прецизионной репликации, из которых выбрано три образца таких линз;

– выполнено реплицирование асферических поверхностей трех выбранных образцов

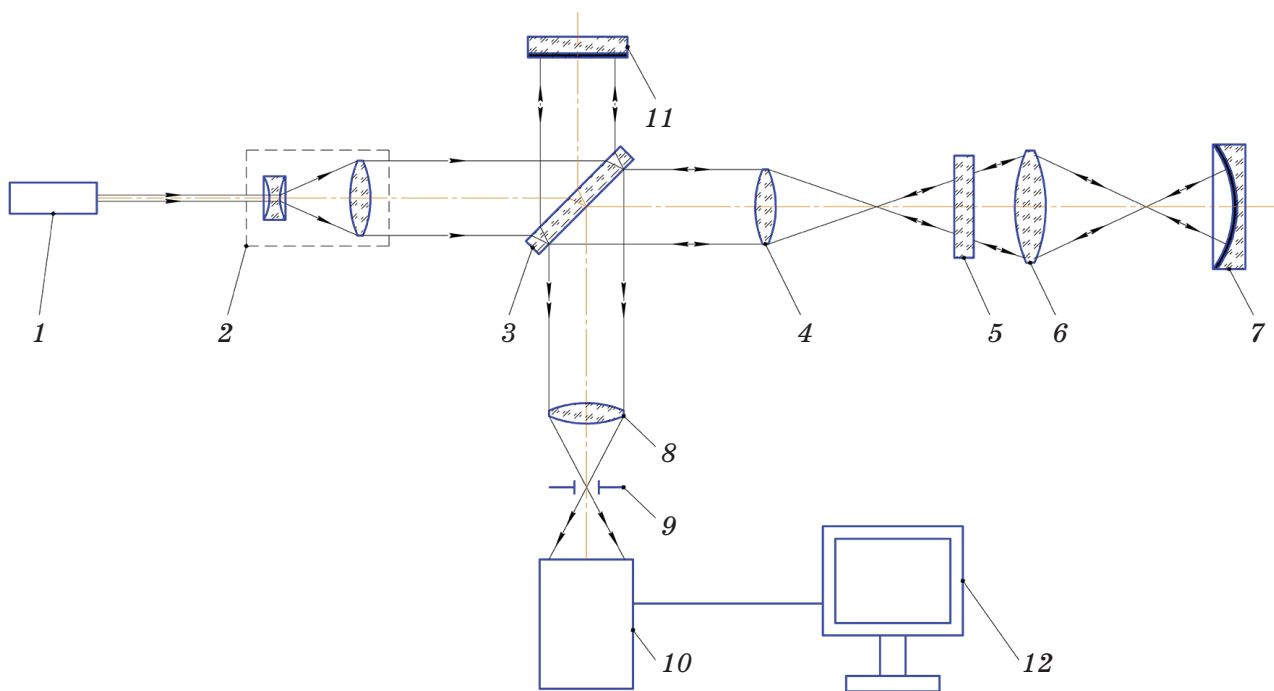


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема лазерно-голографического интерферометра типа Тваймана–Грина для контроля реплицированных линз в проходящем свете. 1 — гелий-неоновый лазер (длина волны излучения 632,8 нм), 2 — расширитель, 3 — светоделитель, 4 — формирующий объектив, 5 — СГОЭ-компенсатор, выполняющий функции нуль-корректора, 6 — контролируемая реплицированная линза, 7 — образцовое сферическое зеркало или мастер-матрица, 8 — сопрягающий проекционный объектив, 9 — диафрагма, 10 — телевизионная камера, 11 — плоское опорное зеркало, 12 — персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением

Fig. 2. Basic optical diagram of a laser-holographic Twyman–Green interferometer for testing replicated lenses in transmitted light. (1) helium-neon laser (radiation wavelength 632.8 nm), (2) expander, (3) beam splitter, (4) forming objective, (5) computer-generated holographic optical compensator element acting as a zero-corrector, (6) replicated lens under test, (7) reference spherical mirror or master detail, (8) connecting projection lens, (9) diaphragm, (10) TV camera, (11) flat supporting mirror, (12) personal computer with appropriate software

линз (рис. 1) на основе использования имеющегося в НПО ГИПО фотополимера;

– нанесены просветляющие покрытия на реплицированные АП трех образцов линз;

– выполнен интерферометрический контроль трех реплицированных линз.

На рис. 2 представлена принципиальная оптическая схема лазерно-голографического интерферометра типа Тваймана–Грина, предназначенного для выполнения оптического контроля реплицированных линз, восстановленных из брака (параметр контроля — СКО волнового фронта линзы), на рис. 3 — фотография общего вида применявшегося осевого СГОЭ-компенсатора (см. рис. 2, поз. 5).

Технологический и аттестационный контроль вогнутой рабочей поверхности изготовленной мастер-матрицы проводился в том же интерферометре со следующими отличиями: в поз. 5 размещался СГОЭ-компенсатор для контроля вогнутой рабочей АП мастер-матрицы, которая устанавливалась соосно с ним в поз. 7 на расчетном расстоянии от этого элемента, что обеспечивалось с помощью соответствующей кольцевой юстировочной голограммы. Контролируемая линза в этом случае отсутствовала. В качестве иллюстрации на рис. 4 приводится интерферограмма контролируемой рабочей АП мастер-матрицы.

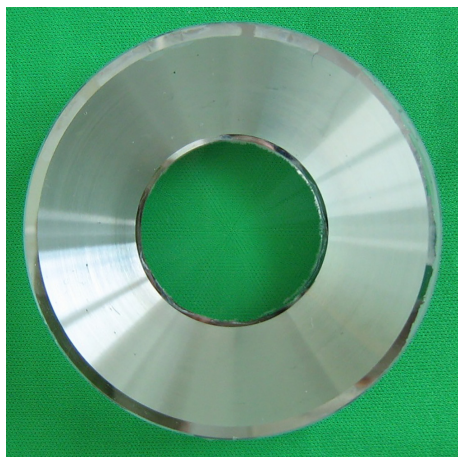


Рис. 3. Общий вид осевого СГОЭ-компенсатора для контроля асферической линзы (наибольшее значение пространственной частоты голограммы 78 мм^{-1})

Fig. 3. General view of an on-axis computer-generated holographic optical compensator element for aspherical lens testing (maximum value of hologram spatial frequency is 78 mm^{-1})

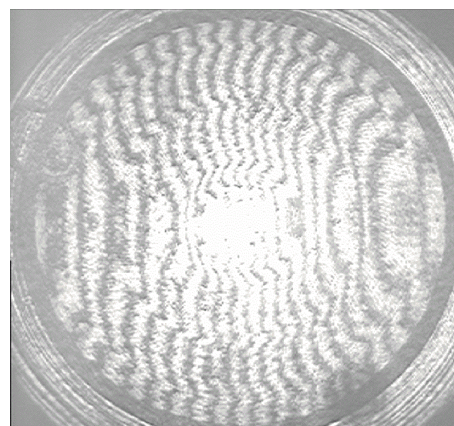


Рис. 4. Интерферограмма рабочей АП мастер-матрицы, СКО волнового фронта — $0,19 \text{ мкм}$

Fig. 4. An interferogram of a working aspherical surface of the master detail, wavefront root mean square deviation is $0,19 \text{ }\mu\text{m}$

Результаты тестирования трех образцов реплицированных линз, восстановленных из партии брака по АП, представлены на рис. 5.

Затем образец № 1 (средний по значению СКО) с реплицированной АП, на которую было нанесено просветляющее покрытие, подвергался испытаниям в НПЗ на механическую прочность, прочность к воздействию органических растворителей, повышенной и пониженной температуры, к воздействию температуры $-196 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (при этом образец линзы испытывался будучи в упаковке), на прочность к воздействию перепада температур, а также к воздействию термического удара, на влагонепрочность согласно требованиям отраслевого стандарта (ОСТ) [7] и с использованием соответствующего испытательного оборудования. При этом контролируемыми оптическими параметрами образца № 1 линзы (до, в процессе и после испытаний) были чистота просветленной реплицированной асферической поверхности (метод контроля регламентируется требованиями государственного стандарта (ГОСТ) [8]) и коэффициент пропускания линзы вдоль оптической оси на средней длине волны $\lambda_{\text{ave}} = 550 \pm 20 \text{ нм}$ (метод контроля регламентируется требованиями ОСТ [7]).

Перед началом испытаний и после каждого воздействия в процессе испытаний проводился осмотр внешнего вида образца № 1 линзы согласно ГОСТ [8] с помощью лупы с увеличением $6\times$ и сканирующего профилометра, осно-

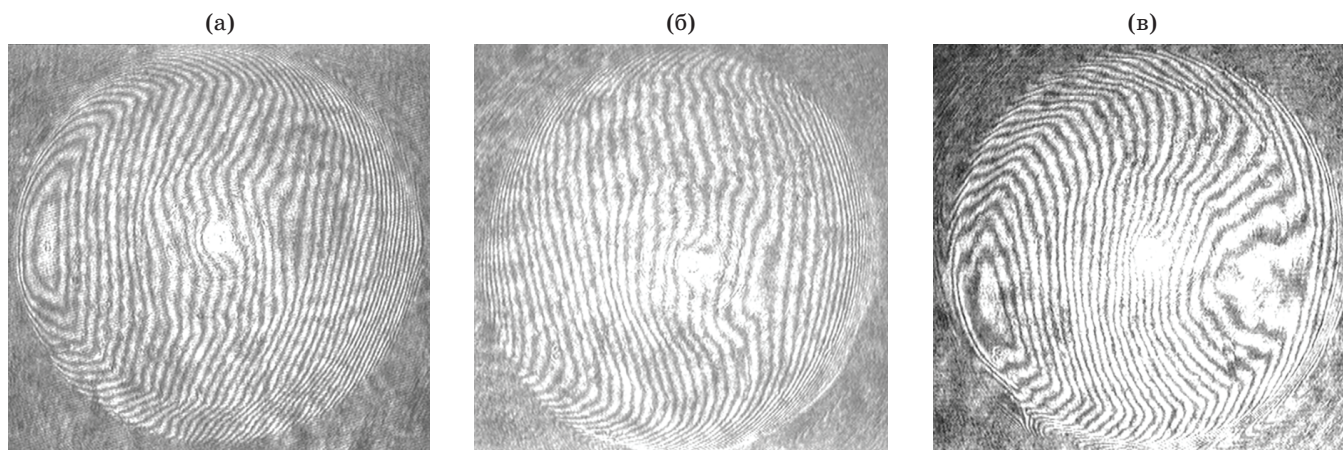


Рис. 5. Интерферограммы изготовленных в НПО ГИПО реплицированных линз (контроль в проходящем свете, см. рис. 2). Образец № 1, СКО волнового фронта 0,36 мкм (а), образец № 2, СКО волнового фронта 0,26 мкм (б), образец № 3, СКО волнового фронта 0,45 мкм (в)

Fig. 5. Interferograms of replicated lenses made at NPO GIPO (control in transmitted light, see fig. 2). (a) Sample № 1, wavefront root mean square deviation is 0.36 μm , (б) Sample № 2, wavefront root mean square deviation is 0.26 μm , (в) Sample № 3, wavefront root mean square deviation is 0.45 μm

ванного на принципе действия конфокальных датчиков сканирования.

Образец № 1 линзы продемонстрировал положительные результаты испытаний, по окончании которых класс чистоты реплицированной АП линзы не изменился после проведения всех испытаний, коэффициент пропускания линзы вдоль оптической оси на $\lambda_{\text{ave}} = 550 \pm 20$ нм соответствует значению, заданному в технической документации, а полимерный слой и просветляющее покрытие реплицированной АП линзы выдержали внешние воздействующие факторы. То есть испытуемые полимерный слой и данное оптическое покрытие линзы являются влагопрочными, стойкими к воздействию органических растворителей, повышенной температуры 80 °С, пониженных температур –50 и –196 °С, к воздействию перепада температур от –60 до 80 °С и к термическому удару.

После указанных испытаний образец № 1 линзы был установлен в оптическую систему окуляра, у которого был измерен его модуль оптической передаточной функции (МОПФ) [9, 10] в целях сравнения с МОПФ окуляра, собранного из штатных, полностью стеклянных, линз. Эти измерения МОПФ окуляров проводились на специализированном оборудовании также на НПЗ.

На рис. 6 представлены графики усредненных значений МОПФ обоих окуляров и граница

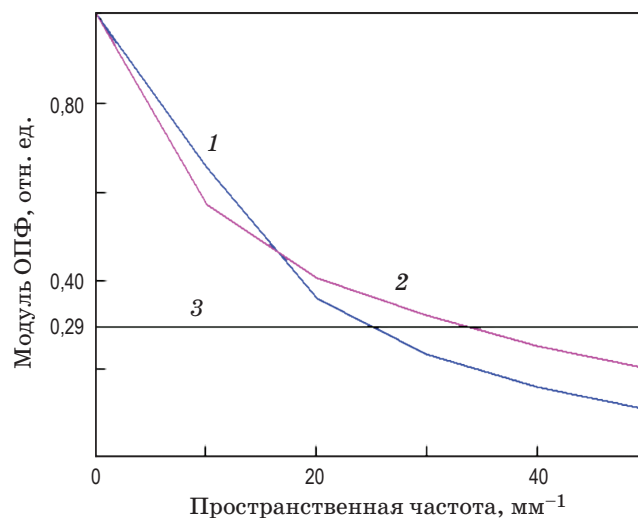


Рис. 6. Графики МОПФ сравниваемых окуляров. 1 — окуляр с образцом № 1 реплицированной линзы, 2 — окуляр со штатной, полностью стеклянной, линзой, 3 — граница допуска МОПФ

Fig. 6. Optical transfer function modulus graphs of eyepieces under comparison. (1) Eyepiece with Sample № 1 replicated lens, (2) eyepiece with a regular lens fully made from glass, (3) tolerance limit of the optical transfer function module

допустимых значений МОПФ для окуляра данного типоразмера. При этом следует отметить, что погрешность измерений МОПФ окуляров составляет $\pm 2\%$, а повторяемость измерений $\pm 1\%$.

Назначенный допуск на МОПФ — контраст должен быть не менее 0,29 на пространственной частоте 20 мм^{-1} . Из рис. 6 видно, что график МОПФ окуляра с испытуемым образцом № 1 линзы соответствует заданному допуску. Различия между кривыми 1 и 2 обусловлены тем, что испытуемый образец реплицированной линзы был установлен в корпус окуляра с большей остаточной децентрировкой, чем штатная, полностью стеклянная, линза.

Отметим, что не удалось выявить ни в одной из многочисленных просмотренных отечественных и зарубежных публикаций (см., например [11–21]) по различным аспектам получения оптических элементов методом реплицирования какой-либо информации о возможном дополнительном использовании этой технологии, ставшем предметом исследования данной статьи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При серийном и массовом производстве объектов и окуляров различного назначения неизбежно появление заметной доли оптических деталей (линз и зеркал), забракованных отделом технического контроля по качеству их рабочих поверхностей (среднеквадратическое отклонение, класс чистоты и уровень шероховатости).

Результаты комплексных испытаний, проведенных в ходе настоящей работы, на примере образца реплицированной линзы подтверж-

дают реализуемость предложенного решения и высокую практическую значимость при серийном и массовом производстве: применение прецизионного реплицирования с использованием, в частности, малоусадочного фотополимера [21] является перспективным и экономически целесообразным направлением для решения задачи восстановления оптических деталей (асферических и сферических линз и зеркал), забракованных по форме, классу чистоты и параметрам шероховатости их рабочих поверхностей. При этом подтверждена установленная нами ранее [2, 3] особенность данной технологии: по СКО, классу чистоты и уровню шероховатости восстановленные АП идентичны соответствующим параметрам рабочей поверхности использованной мастер-матрицы.

В продолжение этих совместных работ запланировано проведение ускоренных испытаний образца реплицированной линзы на сохраняемость с учетом выполнения контроля основных оптических параметров, а также измерения МОПФ окуляра, собранного с использованием этого образца линзы. При этом необходимо отметить, что в настоящее время испытание на сохраняемость в условиях отапливаемого помещения с естественным ходом времени проходит опытная партия реплицированных асферических линз, изготовленная в НПО ГИПО по контракту, причем у этих линз до сих пор не обнаруживаются никакие признаки деградации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Карлин О.Г., Кукс В.Г., Липовецкий Л.Е. и др. Изготовление и контроль асферической оптики. М.: ЦНИИ информации, 1980. 272 с.
2. Лукин А.В., Мельников А.Н. Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей — научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 10. С. 42–50. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-10-42-50>
3. Лукин А.В., Мельников А.Н., Ахметов М.М. и др. Реплицированная асферическая оптика. Основные аспекты организации серийного и массового производства // Контенант. 2017. Т. 16. № 2. С. 167–172.
4. Белозёров А.Ф., Ларионов Н.П., Лукин А.В. и др. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Ч. 1., Ч. 2 // Фотоника. 2014. № 4. С. 12–32; № 5. С. 30–41.
5. ОСТ 3–4730–80 – ОСТ 3–4732–80. Сборник отраслевых стандартов. Детали оптические с асферическими

REFERENCES

1. Karlin O.G., Kuks V.G., Lipovetsky L.E., et al. Manufacture and testing of aspherical optical elements [in Russian]. Moscow: Central Research Institute of Information, 1980. 272 p.
2. Lukin A.V., Melnikov A.N. Precision replication of all types of optical surfaces — scientific and technological basis for radical transformation of modern optical production // J. Opt. Technol. 2022. V. 89. № 10. P. 589–594. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000589>
3. Lukin A.V., Melnikov A.N., Akhmetov M.M., et al. Replicated aspherical optical elements. Main aspects of organizing mass and batch production [in Russian] // Kontenant. 2017. V. 16. № 2. P. 167–172.
4. Belozarov A.F., Larionov N.P., Lukin A.V., et al. On-axis computer-generated hologram optical elements: History of development and use. Parts 1, 2 [in Russian] // Photonics Russia. 2014. № 4. P. 12–32; № 5. P. 30–41.
5. OST (Industry Standard) 3–4730–80 – OST 3–4732–80. Collection of industry standards. Optical parts with

- поверхностями. Метод контроля с использованием синтезированных голограмм. Введ. 01.01.1981. М.: изд. ЦНИИ «Комплекс», 1980. 69 с.
6. ГОСТ Р 59737–2021. Оптика и фотоника. Элементы оптические голограммные синтезированные осевые. Общие технические условия. Введ. 01.03.2022. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 40 с.
 7. ОСТ 3–1901–95. Покрывтия оптических деталей. Типы, основные параметры и методы контроля. Введ. 01.09.1995. М.: изд. ЦНИИ «Комплекс», 1995. 191 с.
 8. ГОСТ 11141–84. Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля. Введ. 01.01.1985. М.: изд. Стандартов, 1984. 15 с.
 9. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Высшая школа, 1981. 229 с.
 10. Smith W.J. Modern optical engineering. The design of optical systems. N.Y.: SPIE Press, 2008. 754 p.
 11. Braat J.J.M., Smid A., Wijnakker M.M.B. Design and production technology of replicated aspheric objective lenses for optical disk systems // Appl. Opt. 1985. V. 24. № 12. P. 1853–1855. <http://doi.org/10.1364/AO.24.001853>
 12. Zwiers R.J.M., Dortant G.C.M. Aspherical lenses produced by a fast high-precision replication process using UV-curable coatings // Appl. Opt. 1985. V. 24. № 24. P. 4483–4488. <http://doi.org/10.1364/AO.24.004483>
 13. Zwiers R.J.M., Braat J.J.M., Dortant G.C.M. A replicated bi-aspherical readout lens for optical disc systems // Proc. SPIE. 1986. V. 645. P. 53–57. <https://doi.org/10.1117/12.964486>
 14. Zwiers R.J.M. Materials for replication technology — a fast & high-precision manufacturing method for optical components // Materials & Design. 1987. V. 8. № 3. P. 170–175. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(87\)90168-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(87)90168-3)
 15. Восковцева Л.М., Давлетшина З.Ю., Камардин Ю.Б. и др. Исследование полимерных материалов для изготовления пропускающих копий дифракционных оптических элементов для УФ-области спектра // Оптическая техника. 1995. № 3(7). С. 33–34.
 16. Handbook of optical engineering / Eds Malacara D., Thompson B.J. N.Y. — Basel: Marcel Dekker, Inc., 2001. 978 p.
 17. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др. Справочник технолога-оптика / Под ред. Окатова М.А. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
 18. Серова В.Н. Оптические и другие материалы на основе прозрачных полимеров. Казань: КГТУ, 2010. 540 с.
 19. Wang Q., Zhao Yu., Zhang L., et al. New exploration of the optical aspherical replication technique // Proc. SPIE. 2010. V. 7655. P. 76551S-1–76551S-5. <https://doi.org/10.1117/12.866283>
 20. Серова В.Н. Полимерные оптические материалы. СПб.: изд. НОТ, 2015. 382 с.
 21. Жданова А.В., Михайлов В.Н., Бабкин О.Э. и др. Малоусадочные фотополимеризующиеся композиции для прецизионной репликации элементов дифракционной и асферической оптики. Первые результаты и перспективы / Инновационные материалы и технологии в дизайне // Сборник тез. докл. III Всерос. науч.-техн. конф. с участием молодых ученых. 2017. СПб.: СПбГИКиТ, 2017. С. 26–27.
 - aspherical surfaces. A testing method involving computer-generated holograms [in Russian]. Introduced on January 1, 1981. Moscow: “Kompleks” Central Research Institute Publishing, 1980. 69 p.
 6. GOST R (Russian National Standard) 59737–2021. Optics and photonics. Optical hologram computer-generated on-axis elements. General specifications [in Russian]. Introduced on March 1, 2022. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. 40 p.
 7. OST (Industry Standard) 3–1901–95. Coatings of optical parts. Types, main parameters and testing methods [in Russian]. Introduced on September 1, 1995. Moscow: “Kompleks” Central Research Institute Publishing, 1995. 191 p.
 8. GOST (Russian National Standard) 11141–84. Optical parts. Surface finish classes. Methods of control [in Russian]. Introduced on January 1, 1985. Moscow: Standards Publ., 1984. 15 p.
 9. Afanasyev V.A. Optical measurements [in Russian]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 1981. 229 p.
 10. Smith W.J. Modern optical engineering. The design of optical systems. N.Y.: SPIE Press, 2008. 754 p.
 11. Braat J.J.M., Smid A., Wijnakker M.M.B. Design and production technology of replicated aspheric objective lenses for optical disk systems // Appl. Opt. 1985. V. 24. № 12. P. 1853–1855. <http://doi.org/10.1364/AO.24.001853>
 12. Zwiers R.J.M., Dortant G.C.M. Aspherical lenses produced by a fast high-precision replication process using UV-curable coatings // Appl. Opt. 1985. V. 24. № 24. P. 4483–4488. <http://doi.org/10.1364/AO.24.004483>
 13. Zwiers R.J.M., Braat J.J.M., Dortant G.C.M. A replicated bi-aspherical readout lens for optical disc systems // Proc. SPIE. 1986. V. 645. P. 53–57. <https://doi.org/10.1117/12.964486>
 14. Zwiers R.J.M. Materials for replication technology — a fast & high-precision manufacturing method for optical components // Materials & Design. 1987. V. 8. № 3. P. 170–175. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(87\)90168-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(87)90168-3)
 15. Voskovtseva L.M., Davletshina Z.Yu., Kamardin Yu.B., et al. Research of polymeric materials for manufacturing transmitting copies of diffraction optical elements for UV spectral range [in Russian] // Opticheskaya Tekhnika. 1995. № 3(7). P. 33–34.
 16. Handbook of optical engineering / Eds Malacara D., Thompson B.J.. N.Y. — Basel: Marcel Dekker, Inc., 2001. 978 p.
 17. Okatov M.A., Antonov E.A., Baygozhin A., et al. Optical technologist's handbook [in Russian] / Ed. Okatov M.A. St. Petersburg: Politekhnik Publ., 2004. 679 p.
 18. Serova V.N. Optical and other materials based on transparent polymers [in Russian]. Kazan: KSTU, 2010. 540 p.
 19. Wang Q., Zhao Yu., Zhang L., et al. New exploration of the optical aspherical replication technique // Proc. SPIE. 2010. V. 7655. P. 76551S-1–76551S-5. <https://doi.org/10.1117/12.866283>
 20. Serova V.N. Polymeric optical materials [in Russian]. St. Petersburg: NOT Publ., 2015. 382 p.
 21. Zhdanova A.V., Mikhailov V.N., Babkin O.E., et al. Low shrinkage photo-polymerizing compositions for precision replication of diffraction and aspherical optical elements. First results and prospects [in Russian] / Innovative materials and technologies in the field of design // Collection of abstracts from the 3rd All-Russian Sci. Conf. Featuring Young Researchers. 2017. St. Petersburg: SPbGIKIT, 2017. P. 26–27.

АВТОРЫ

Анатолий Васильевич Лукин — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, 420075, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>; gipo@telebit.ru

Никита Андреевич Гурин — главный оптик, начальник отдела главного оптика, Новосибирский приборостроительный завод, Новосибирск, 630049, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-9760-7316>; gna200694@yandex.ru

Андрей Николаевич Мельников — кандидат технических наук, доцент, начальник отдела, Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, 420075, Россия; Scopus ID: 1659222; <https://orcid.org/0000-0002-3318-9853>; gipo@telebit.ru

Елена Галимулловна Лисова — инженер-технолог 1 категории, Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, 420075, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3609-3336>; gipo@telebit.ru

Алиса Александровна Свистунова — инженер-технолог, Новосибирский приборостроительный завод, Новосибирск, 630049, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-4990-2761>; alisasvistunova17@gmail.ru

AUTHORS

Anatoly V. Lukin — Doctor of Engin. Sciences (Habilitation), Professor, Chief Researcher, JSC “State Institute of Applied Optics”, Kazan, 420075, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>; gipo@telebit.ru

Nikita A. Gurin — Chief Optician, Head of Chief Optician's Department, Novosibirsk Instrument-Building Plant, Novosibirsk, 630049, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-9760-7316>; gna200694@yandex.ru

Andrei N. Melnikov — PhD, Associate Professor, Head of Department, JSC “State Institute of Applied Optics”, Kazan, 420075, Russia; Scopus ID: 1659222; <https://orcid.org/0000-0002-3318-9853>; gipo@telebit.ru

Elena G. Lisova — Engineer-technologist of the 1st category, JSC “State Institute of Applied Optics”, Kazan, 420075, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3609-3336>; gipo@telebit.ru

Alisa A. Svistunova — Engineer-technologist, Novosibirsk Instrument-Building Plant, Novosibirsk, 630049, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4990-2761>; alisasvistunova17@gmail.ru

Статья поступила в редакцию 24.01.2023
Одобрена после рецензирования 26.04.2023
Принята к печати 29.05.2023

The article was submitted to the editorial office 24.01.2023
Approved after review 26.04.2023
Accepted for publication 29.05.2023