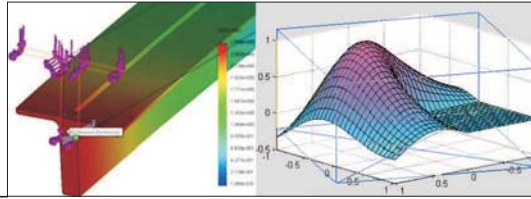


## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 620.172.21

С.И. ГЕРАСИМОВ, В.А. ЖИЛКИН, А.М. ПОПОВ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МУАРА

Применяемые в настоящее время в современных конструкциях материалы резко изменяют свои механические свойства при влиянии пониженных эксплуатационных температур. Одним из факторов, влияющих на разрушение различных элементов конструкций при пониженных температурах, являются места концентрации напряжений. В существующих расчетных схемах не всегда удается достаточно корректно учесть изменение механических свойств материала, вызванных понижением температуры. В настоящей работе рассмотрен метод контактной голографической интерферометрии, позволивший эффективно определять поверхностные перемещения и деформации при температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

К л ю ч е в ы е с л о в а: голографическая интерферометрия, температурная задача.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-725-5-113-120

**Введение.** Контактный голографический интерферометр представляет собой совокупность исследуемой светоотражающей поверхности и расположенной на ней высокочастотной регистрирующей среды [1–4]. Этот прием широко используется для определения тангенциальных и нормальных перемещений точек поверхности исследуемых элементов конструкций [5]. Если голографическая интерферограмма регистрируется вблизи металлизированного высокочастотного раstra, то она воспроизводит информацию, свойственную ряду оптических методов: традиционной голографической интерферометрии, спекл-фотографии, голографическому муару и зеркально-оптическому методу. Для расшифровки интерференционных картин в работах [6–7] получены простые аналитические уравнения. Контактные голографические интерферометры эффективно используются для решения ряда задач строительной механики и механики твердого деформируемого тела [8–10].

**1. Влияние температуры окружающей среды.** Вследствие того что материалы составных частей контактного голографического интерферометра (регистрирующая среда, стеклянная подложка, промежуточная оптическая среда (ПОС)) обладают различными физико-механическими свойствами, оценим их чувствительность к температуре по отдельности.

© Герасимов С.И., Жилкин В.А., Попов А.М., 2019

*Регистрирующая среда.* В рамках рассматриваемой работы применялись голографические эмульсии ПФГ-03. Их толщина не превышает 20 мкм. Испытания контактного голографического интерферометра проводились в воздушной среде при температурах от  $-50$  до  $+100$  °С. Нижний предел температурного диапазона ограничивался возможностями имевшегося холодильного оборудования (термобарокамера ТВВ-2000), а верхний – механической прочностью основы фотоэмульсии. При таких температурах удалось методом двух экспозиций зарегистрировать голографические интерферограммы удовлетворительного качества.

*Промежуточная оптическая среда.* Используемый в интерферометре в качестве ПОС каучук СКТН не разрушается вплоть до  $+600$  °С и, как показали исследования, не меняет существенно свои упругие характеристики при  $-50$  °С (температура его охрупчивания  $-75$  °С).

Оценим погрешность, возникающую из-за того, что прикрепление фотопластинки 1 к объекту 3 посредством ПОС 2 производится при комнатной температуре, а само испытание проходит при иной температуре (рис. 1).

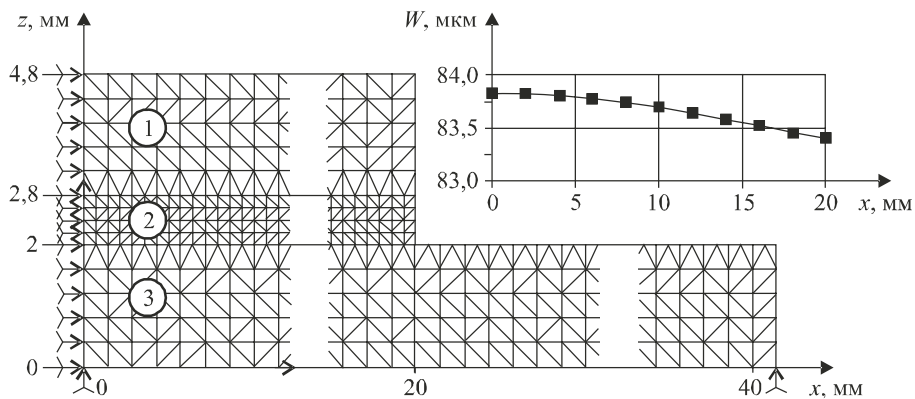


Рис. 1. Конечно-элементная модель интерферометра и результаты оценки влияния температуры окружающей среды  
1 – стекло, 2 – каучук, 3 – сталь

С помощью вычислительной системы COSMOS/M определим напряжения в стеклянной подложке и в слое СКТН, а также найдем прогибы голографической эмульсии. Для этого воспользуемся конечно-элементной моделью накладного интерферометра, изображенного на рис. 1. Упругие характеристики различных слоев при температуре  $T = 20$  °С даны в таблице, где  $E_x$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $G_{xz}$  – модуль сдвига;  $\alpha_x$  – коэффициент линейного расширения;  $K_x$  – температурная проводимость.

Расчет проводился для стационарного температурного поля. Приращение температуры  $\Delta T$  составляло 80 °С. На рис. 1 представлены перемещения  $W$  точек конечно-элементной модели с координатами  $z = 2,8$  мм. Для нас интерес представляют не абсолютные перемещения, а интервал их изменений. Из графика следует, что на базе 20 мм прогиб фоторегистрирующей

**Упругие характеристики слоев интерферометра**

	1 – стекло	2 – резина	3 – сталь
$E_x$ , Па	$6,3 \cdot 10^{10}$	$6,1 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^{11}$
$\nu$	0,22	0,49	0,28
$G_{xz}$ , Па	$2,6 \cdot 10^{10}$	$2,9 \cdot 10^6$	$7,9 \cdot 10^{10}$
$\alpha_x$ , град <sup>-1</sup>	$9,9 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
$K_x$ , Дж/(кг · град)	1,6	0,14	50

среды составляет 0,4 мкм. Это приведет к появлению примерно одной добавочной интерференционной полосы. Соответствующие поправки необходимо учитывать при расшифровке интерферограмм.

Далее определим влияние температурных напряжений в ПОС на его оптические характеристики. По данным численного расчета (COSMOS/M) ни в одном узле напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  не превысили 400 Па. В этом случае в соответствии с законом Максвелла–Неймана величины  $\Delta n_1$  и  $\Delta n_2$  не превысят  $10^{-7}$ , что позволяет пренебречь наведенным температурным фотоэффектом.

**2. Экспериментальные результаты.** *Результаты лабораторных испытаний.* Плоский образец из сплава Ст. 3 с рабочей длиной 200 мм, поперечным сечением 50,2×1,5 мм и центральным круговым отверстием диаметром 10 мм устанавливали в нагрузочное устройство, смонтированное в термокамере ТВВ-2000. В этой камере имелось окно из кварцевого стекла, позволяющее освещать образец лазерным пучком извне и синхронно вести визуальное наблюдение. Равномерность температурного поля обеспечивалась за счет значительного по сравнению с образцом внутреннего объема камеры.

На одну сторону образца был нанесен металлизированный ортогональный растр с частотами  $\psi_x = \psi_y = 850 \text{ мм}^{-1}$ . Фотопластинка прикреплялась на рабочей стороне образца с помощью ПОС, полимеризацию которой проводили при комнатной температуре.

Воздух в камере охлаждали до  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  и записывали методом двух экспозиций голографическую интерферограмму. После нагружения образца до 4 кН перед второй экспозицией делали выдержку длительностью около 300 с. Затем фотопластинку отделяли от образца и проявляли при комнатной температуре. На рис. 2, а приведена фотография восстановленной интерференционной картины.

Для расшифровки интерферограмм использовался метод, в котором определение полей напряжений и деформаций является результатом решения плоской краевой задачи теории упругости или пластичности, полученного путем численной реализации метода граничных интегральных уравнений [11]. Так как экспериментальным путем порядки полос  $N_k$  определяются только в точках их пересечения с границами исследуемой области, то возникает проблема аппроксимации функции порядков полос  $N(x, y)$  вдоль этих границ на неравномерно заданной сетке. Границы области отождествлялись с осями кольцевых статически неопределимых балок, имеющих опоры в местах пересечения их осей с центрами интерференционных полос. Сечения кольцевых балок в пределах каждого участка между опорами счита-

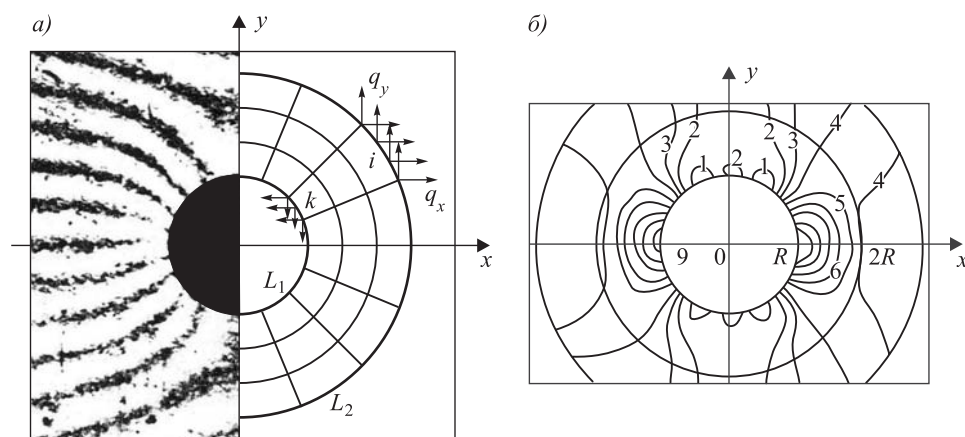


Рис. 2. Интерференционная картина, зарегистрированная при  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и расчетная схема для ее расшифровки (а). Результат расшифровки в виде изолиний интенсивности деформаций (б) с ценой полосы  $8,2 \cdot 10^{-5}$

лись постоянными. Аппроксимирующие полиномы искали в виде упругих линий изгиба кольцевых балок, внешнее воздействие на которые задается известным смещением опор в направлении, перпендикулярном плоскости их кривизны на величины, пропорциональные порядкам интерференционных полос.

Пусть заданная область является частью сплошной бесконечной плоскости единичной толщины, внутри которой по контурам  $L_1$  и  $L_2$  действуют некоторые неизвестные, подлежащие определению, распределенные нагрузки  $q_x$  и  $q_y$  (рис. 2, а), при которых на контурах  $L_1$  и  $L_2$  выполняются заданные граничные условия.

Каждый из контуров границы  $L_1$  и  $L_2$  разбивается на  $n$  достаточно малых участков, в пределах которых неизвестные распределенные нагрузки  $q_x$  и  $q_y$  считаются постоянными. При решении задачи по предлагаемой схеме используется фундаментальное решение для сосредоточенной силы, действующей в бесконечной плоскости [12]. Сила приложена в начале декартовой системы координат и по направлению совпадает с осью  $x$ . Выражения компонент напряжений и смещений по двум взаимно перпендикулярным площадкам, проходящим через точку с координатами  $(x, y)$ , имеют вид:

$$\sigma_x = \frac{P}{4\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} \left[ -(3+\nu) + (1+\nu) \frac{2y^2}{x^2 + y^2} \right], \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{P}{4\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} \left[ 1 - \nu - 2(1+\nu) \frac{y^2}{x^2 + y^2} \right], \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{P}{4\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} \left[ 1 - \nu + 2(1+\nu) \frac{x^2}{x^2 + y^2} \right], \quad (3)$$

$$U = -\frac{P}{8\pi G} \left[ \frac{3-\nu}{2} \ln(x^2 + y^2) + (1+\nu) \frac{y^2}{x^2 + y^2} \right], \quad (4)$$

$$V = \frac{P}{8\pi G}(1+\nu)\frac{xy}{x^2 + y^2}, \quad (5)$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Напряжения и перемещения в точках области, расположенных вне участка приложения распределенных нагрузок  $q_x$  и  $q_y$ , определяются по формулам (1)–(5) от действия сосредоточенной силы, являющейся равнодействующей этих нагрузок в пределах участка их приложения. Для точки, принадлежащей этому участку, напряжения и перемещения определяются от суммарного действия системы сосредоточенных сил, эквивалентно заменяющих равномерно распределенную нагрузку. При вычислении напряжений в этом случае к вычисленным значениям соответствующих компонент добавляются дополнительные слагаемые, учитывающие сингулярность. От действия равномерно распределенной нагрузки  $q_x$  эти дополнительные слагаемые определяются по формулам:

$$\sigma_x = \pm 1/2q_x \cos\delta [1 + (1+\nu)\sin^2\delta], \quad (6)$$

$$\sigma_y = \pm 1/2q_x \cos\delta [\sin^2\delta - \nu \cos^2\delta], \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = \pm 1/2q_x \sin\delta (\sin^2\delta - \nu \cos^2\delta), \quad (8)$$

где  $\delta$  – угол между нормалью к участку контура границы в рассматриваемой точке и осью  $x$ .

Используя решение от действия равномерно распределенной нагрузки  $q_x$  и  $q_y$  в пределах участка, можно суммированием по всем участкам найти полные выражения для перемещений точек границы области. Краевые условия записываются для срединных точек участков разбиения границы и включают  $4n$  неизвестных значений нагрузок  $q_x$  и  $q_y$ . Таким путем получаем систему линейных уравнений, из решения которой определяются значения  $q_x$  и  $q_y$ , а далее – напряжения и смещения на границе и внутри заданной области.

При расшифровке интерферограммы, приведенной на рис. 2, а, исследуемая область ограничивалась соосной отверстию окружностью радиусом  $3R$ , где  $R$  – радиус отверстия. Дискретизация каждой границы в данном случае осуществлялась 36 граничными элементами с равным угловым шагом  $10^\circ$ . Кроме того, при решении задачи в качестве граничных условий учитывалось отсутствие внешних нагрузок на контуре отверстия. Изолинии поля интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  приведены на рис. 2, б.

*Результаты натурных испытаний.* После проверки возможности использования накладных голографических интерферометров в условиях лаборатории были проведены натурные исследования при температуре воздуха  $-38^\circ\text{C}$ .

Все элементы оптической схемы, формирующей расширенный лазерный пучок, размещались в теплом здании. Излучение через специальное окно выводилось на улицу, где с помощью зеркала направлялось на поверхность образца. Материал изделия – сплав Д16, его размеры: ширина – 100,2 мм, толщина – 1,8 мм, диаметр центрального кругового отверстия – 20,5 мм. На лицевую поверхность образца предварительно был нанесен растр с частотой



Рис. 3. Интерференционная картина, зарегистрированная при  $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$  в натуральных условиях

изменении нагрузки от  $P_1 = 700\text{ Н}$  до  $P_2 = 2700\text{ Н}$ . Относительно низкое качество интерферограмм объясняется рефракцией света от лазера на взвешенных в воздухе частицах (в это время на улице шел снег), а также удаленностью испытательной машины от здания на 20 м.

**Выводы.** Впервые экспериментально подтверждена возможность проведения внестеновых испытаний образцов при отрицательных температурах с использованием голографической интерферометрии. Разработаны методики приготовления ПОС, обеспечивающие стабильность оптико-механических свойств интерферометра во всем диапазоне регистрируемых смещений в условиях разнообразных климатических температур.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Д е н и с ю к Ю.Н. Об отображении физических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Докл. АН СССР. 1962. Т. 144. С. 1275–1278.
2. В о о н е Р.М. Use of reflection holograms in holographic interferometry and speckle correlation for measurement of surface displacements // Opt. Acta. 1975. Vol. 22, No. 5. P. 579–589.
3. Cloud G. Optical methods of engineering analysis. Cambridge University Press. 2008. 520 p.
4. R a z u m o v s k y I.A. Interference-Optical Methods of Solid Mechanics. Berlin Heidelberg: Springer, 2011. 180 p.
5. Ж и л к и н В.А., Г е р а с и м о в С.И. Способ исследования неоднородно деформированных зон изделий в реальном времени с использованием голограмм Ю.Н. Денисюка // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1983. № 1. С. 139–141.
6. Ж и л к и н В.А., Г е р а с и м о в С.И. О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного интерферометра // Журн. техн. физики. 1982. Т. 52. № 10. С. 2079–2085.
7. Г е р а с и м о в С.И., Ж и л к и н В.А., П о п о в А.М. Повышение точности измерения перемещений поверхности деформируемых объектов по способу компенсации интерференционных полос в контактном голографическом интерферометре // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 10. С. 83–92.
8. Г е р а с и м о в С.И., З и н о в ь е в В.Б., П о п о в А.М. Экспериментально-расчетный метод учета нагрева тензодатчика при измерении деформации элементов конструкций // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 6. С. 72–80.

$\psi_x = \psi_y = 950\text{ мм}^{-1}$ , ориентированный вдоль осей симметрии образца. Для нагружения применялась испытательная винтовая машина УМЭ-10ТМ, специально приспособленная для работы в условиях отрицательных температур. Запись голограмм производили через 1,5 ч после выноса образца из теплового помещения. За это время температуры образца и окружающего воздуха выравнивались. На рис. 3 приведена фотография интерферограммы при

9. Pedrini G., Martínez-García V., Weidmann P., Singh A., Osten W. Optical methods for the analysis of residual stresses and measurement of displacements in the nanometric range // IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN): Poitiers, France, 19–21 July 2016. P. 570–575.
10. Yoshizawa T. Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications, Second Edition. CRC Press, 2015. 919 p.
11. Zhilkin V.A., Gerasimov S.I., Kosen'uk V.K. Residual-stress determination through combined use of holographic interferometry and boundary integral equations method // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2342. P. 326–331.
12. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.

**Герасимов Сергей Иванович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 912267@gmail.com

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

**Жилкин Виталий Афанасьевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: zhilkin\_vitalii@mail.ru

Южно-Уральский аграрный университет, г. Троицк

**Попов Анатолий Михайлович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 47604@mail.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 04.04.2019

**Gerasimov Sergey Ivanovich**, DSc, Professor; E-mail: 912267@gmail.com

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**Zhilkin Vitaliy Afanas'evich**, DSc, Professor; E-mail: zhilkin\_vitalii@mail.ru

South Ural State Agrarion University, Troitsk, Russia

**Popov Anatoliy Makhailovich**, DSc, Professor; E-mail: 47604@mail.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

## **APPLICATION OF THE HOLOGRAPHIC MOIRÉ METHOD TO THE ANALYSIS OF METAL OBJECTS AT LOW TEMPERATURE**

The materials currently used in modern constructions drastically change their mechanical properties under the influence of lower operating temperatures. One of the factors affecting the destruction of various structural elements at low temperatures are places of stress concentration. In existing computational schemes, it is not always possible to sufficiently correctly take into account the change in the mechanical properties of a material caused by a decrease in temperature. In this paper, we consider the method of contact holographic interferometry, which made it possible to effectively determine surface displacements and deformations at a temperature of  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Key words:** holographic interferometry, temperature problem.

### **REFERENCES**

1. Denisjuk Yu.N. Ob otobrazhenii fizicheskikh svoystv ob'yekta v volnovom pole rasseyannogo im izlucheniya [On the mapping of the physical properties of an object in the wave field of radiation scattered by it]. Doklady AN SSSR [Reports of USSR Academy of Sciences]. 1962. Vol. 144. Pp. 1275–1278. (in Russian)
2. Boone P.M. Use of reflection holograms in holographic interferometry and speckle correlation for measurement of surface displacements. Opt. Acta. 1975. Vol. 22. No. 5. Pp. 579–589.
3. Clou d G. Optical methods of engineering analysis. Cambridge University Press. 2008. 520 p.

4. Razumovsky I.A. Interference-Optical Methods of Solid Mechanics. Berlin Heidelberg: Springer, 2011. 180 p.
5. Zhilkin V.A., Gerasimov S.I. Sposob issledovaniya neodnorodno deformirovannykh zon izdeliy v real'nom vremeni s ispol'zovaniyem gologramm Yu.N. Denisyuka [Method for investigation of inhomogeneously deformed zones of products in real time using holograms of Yu.N. Denisyuk]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1983. No. 1. Pp. 139–141. (in Russian)
6. Zhilkin V.A., Gerasimov S.I. O vozmozhnosti izucheniya deformirovannogo sostoyaniya izdeliy s pomoshch'yu nakladnogo interferometra [Study of deformed samples using an interferometer attached to the sample]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of technical physics]. 1982. Vol. 27. No. 10. Pp. 1270–1279. (in Russian)
7. Gerasimov S.I., Zhilkin V.A., Popov A.M. Povysheniye tochnosti izmereniya peremeshcheniy poverkhnosti deformiruyemykh ob'yektov po sposobu kompensatsii interferentsionnykh polos v kontaktnom golograficheskom interferometre [Improvement of surface displacements determination accuracy for contact holographic interferometry by interference fringes compensation method]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 10. Pp. 83–92. (in Russian)
8. Gerasimov S.I., Zinov'ev V.B., Popov A.M. Eksperimental'no-raschetnyy metod ucheta nagreva tenzodatchika pri izmerenii deformatsii elementov konstruktsiy [Evaluation of strain-measurement error caused by heating of strain gauge]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 6. Pp. 72–80. (in Russian)
9. Pedrini G., Martínez-García V., Weidmann P., Singh A., Osten W. Optical methods for the analysis of residual stresses and measurement of displacements in the nanometric range. IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN): Poitiers, France, 19–21 July 2016. Pp. 570–575.
10. Yoshizawa T. Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications, Second Edition. CRC Press, 2015. 919 p.
11. Zhilkin V.A., Gerasimov S.I., Kosen'uk V.K. Residual-stress determination through combined use of holographic interferometry and boundary integral equations method. Proc. SPIE. 1994. Vol. 2342. Pp. 326–331.
12. Timoshenko S.P., Goodier J.N. Theory of elasticity. MacGraw Hill Book Company, 1951. 506 p.