

НАГРУЗОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

© 2013 О.А. Журавлев, С.Ю. Комаров, Р.Н. Сергеев¹

Решается задача разработки и создания поверочного нагрузочного устройства для тестирования мобильных цифровых спекл-интерферометров с лазером непрерывного излучения, обеспечивающих определение нормальных деформационных перемещений. Дано аналитическое выражение, связывающее разность фаз интерференционных полей деформированного и исходного состояний объекта с величиной смещения точек его поверхности. Приведены результаты исследований деформаций пластин с разными условиями закрепления и нагружения.

Ключевые слова: спекл-интерферометр, моделирование, нагрузочное устройство, тестирование, деформационное перемещение.

Введение

Особенности условий эксплуатации автоматических космических аппаратов (КА), высокие требования к надежности их конструкции при обеспечении оптимальных массогабаритных характеристик приводят к необходимости разработки новых материалов, методов расчетов и проектирования, а также постоянного совершенствования экспериментальных средств отработки прочности изделий [1].

Актуальной задачей является разработка практических методов и средств испытания и контроля исходных материалов, деталей, сборочных единиц и их соединений при жестких ограничениях на стоимость и время проведения исследований [2].

Следует отметить, что типовыми элементами деталей и сборочных единиц конструкций КА являются пластины и оболочки [3; 4], изготавливаемые из металлических сплавов и композиционных материалов. Применение здесь автоматизированных панорамных средств измерений, дающих количественную информацию во всех точках анализируемой поверхности, становится необходимым условием для получения полной картины напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции КА [5]. Такие высокоинформативные средства измерений создаются на

¹Журавлев Олег Анатольевич (GuravlevSSAU@yandex.ru), Комаров Сергей Юрьевич (sts@e-sam.ru), Сергеев Роман Николаевич (romansr@yandex.ru), кафедра автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета (Национального исследовательского университета), 443001, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

основе принципов голографической интерферометрии, которые в настоящее время реализуются в цифровой спекл-интерферометрии [6].

Обладая такими преимуществами, как бесконтактность, высокая чувствительность, возможность проведения измерений в реальном времени на значительных площадях и способность к автоматизации, цифровые спекл-интерферометры (ЦСИ) находят все большее применение в исследованиях вибропрочности, определении НДС и дефектоскопии конструкций [7–9]. Этому способствует создание специализированных мобильных ЦСИ с лазером непрерывного излучения, использующих наработанный арсенал средств и методов снижения чувствительности интерферометров к случайным воздействиям [10].

Целью представленной работы является создание нагрузочного устройства применительно к задачам тестирования мобильных ЦСИ, использующихся для определения НДС объектов при механическом и термическом нагружениях [11; 12]. Исследования были выполнены с применением созданного в СГАУ стационарного помехоустойчивого ЦСИ с лазером непрерывного действия и разработанным программным обеспечением [13].

1. Принципы получения спекл-интерферограмм при измерении нормальных перемещений

Рассмотрим процесс формирования спекл-интерферограмм деформируемых объектов. Комплексная амплитуда опорного $E_r(x, y)$ и предметного $E_s(x, y)$ пучков может быть представлена выражениями:

$$E_r(x, y) = |E_r(x, y)| \exp[-i\varphi_r(x, y)], \quad (1)$$

$$E_s(x, y) = |E_s(x, y)| \exp\{-i[kW(x, y) + \varphi_s(x, y)]\}, \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; $W(x, y)$ — случайная функция, представляющая фазовый сдвиг, обусловленный микрорельефом оптически шероховатой поверхности; $\varphi_s(x, y)$ — фаза предметного пучка в виде относительно гладкой функции, зависящей от формы объекта, $\varphi_r(x, y)$ — фаза опорного пучка в рассматриваемой точке.

Фотоприемная матрица телекамеры регистрирует результирующую интенсивность $I_1(x, y)$ интерференционной картины, образованной при сложении пучков (1) и (2):

$$I_1(x, y) = I_r(x, y) + I_s(x, y) + 2\sqrt{I_r(x, y)I_s(x, y)} \times \cos[kW(x, y) + \varphi_1(x, y)], \quad (3)$$

где $\varphi_1(x, y)$ — некая неизвестная и практически недоступная определению фазовая функция, обусловленная разностью фаз опорного и предметного пучков. Вид функции $\varphi_1(x, y)$ значения не имеет, т. к. практический интерес представляет изменение этой функции в результате деформации объекта.

При относительно малой деформации объекта интенсивность $I_2(x, y)$ света в плоскости деформации выразится формулой:

$$I_2(x, y) = I_r(x, y) + I_s(x, y) + 2\sqrt{I_r(x, y)I_s(x, y)} \times \cos[kW(x, y) + \varphi_2(x, y)], \quad (4)$$

где $\varphi_2(x, y)$ — фазовая функция, обусловленная формой поверхности объекта в деформированном состоянии.

Так как на экран монитора выводится яркость $B(x, y)$ разностного изображения $\delta I(x, y) = I_2(x, y) - I_1(x, y)$, то ее можно представить в виде:

$$B(x, y) = \Phi(x, y) \left| \sin \frac{1}{2} \Delta \Psi(x, y) \right|, \quad (5)$$

где

$$\Phi(x, y) = 4b \cdot \sqrt{I_r(x, y) I_s(x, y)} \times \sin \left(kW(x, y) + \frac{\varphi_1(x, y) + \varphi_2(x, y)}{2} \right), \quad (6)$$

$$\Delta \Psi(x, y) = \varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y). \quad (7)$$

Изменение фазы $\Delta \Psi(x, y)$ в (5)–(7) можно связать с величиной нормального перемещения $g_z(x, y)$ точки поверхности через выражение

$$\Delta \Psi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} g_z(x, y). \quad (8)$$

Переход от набегу фазы $\Delta \Psi(x, y)$ к числу полос N , на которое сместилась интерференционная картина, дает рабочее соотношение

$$g_z(x, y) = \frac{\lambda N(x, y)}{2}. \quad (9)$$

Для исследования механического нагружения элементов конструкции была разработана программа StatMicroDef.exe, получающая разностное изображение $\delta I(x, y)$ спекл-интерферограмм исходного и деформированного состояний объекта, усредненных по числу заданных кадров для снижения влияния неустойчивости установки.

2. Исследование статических деформаций поверочного устройства голографической установки

Для отработки методик применения ЦСИ было использовано поверочное устройство ОМ-3 (рис. 1), входящее в состав малогабаритной голографической установки УГМ-1 [14]. Рабочая пластина 2 устройства имела на оптическом столе ЦСИ ориентацию в вертикальной плоскости (рис. 1, а). Для этого использовалась дополнительная пластина 11 (рис. 1, б), по которой устройство фиксировалось в тисках. При повороте нагрузочного винта 5 опорный винт 6 малого плеча рычажной системы 3 нажимает на пластину 2 через стальной контактный элемент 8. Стрелочный индикатор 4 позволяет измерять перемещение большого плеча рычага.

Коэффициент передачи движения рычажной системы 3 на пластину 2 составляет 15,03 (по паспорту).

При проведении исследований были получены спекл-интерферограммы деформационных перемещений пластины 2 характерного вида (рис. 2, а). Представленная на рис. 2, а конфигурация интерференционных полос говорит о неравномерности деформационного перемещения пластины. Обнаруженная нелинейность характеристики затрудняет использование устройства по назначению. Численно смоделированная форма изгиба пластины, полученная методом конечных элементов в системе MSC.Nastran, показана на рис. 2, б. Несоответствие полос спекл-интерферограммы на рис. 2, а расчетной может быть обусловлено как смещением оси

опорного винта *б* рычажной системы относительно положения контрольной точки *7* рабочей пластины *2*, так и наличием накопившихся остаточных деформаций в материале пластины.

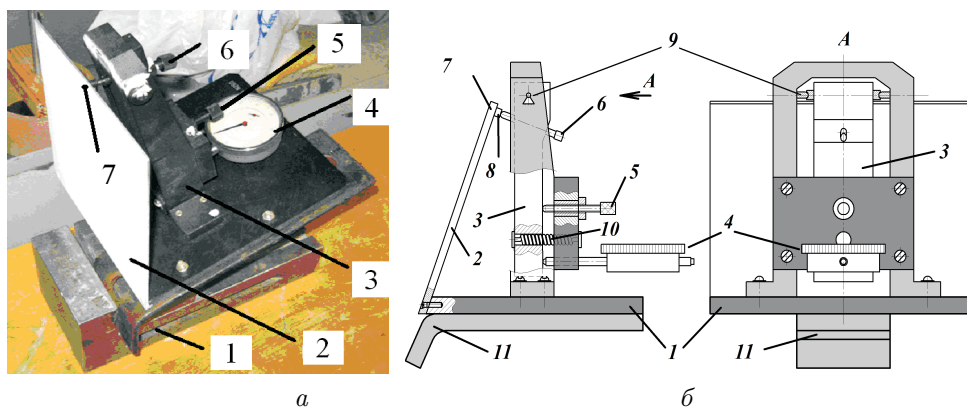


Рис. 1. Общий вид поверочного устройства ОМ-3 (*а*) и схема его конструкции (*б*): *1* — основание; *2* — рабочая пластина; *3* — рычажная система; *4* — стрелочный индикатор; *5* — нагрузочный винт; *6* — опорный винт; *7* — контрольная точка; *8* — контактный элемент; *9* — поворотная ось; *10* — возвратная пружина; *11* — дополнительная пластина

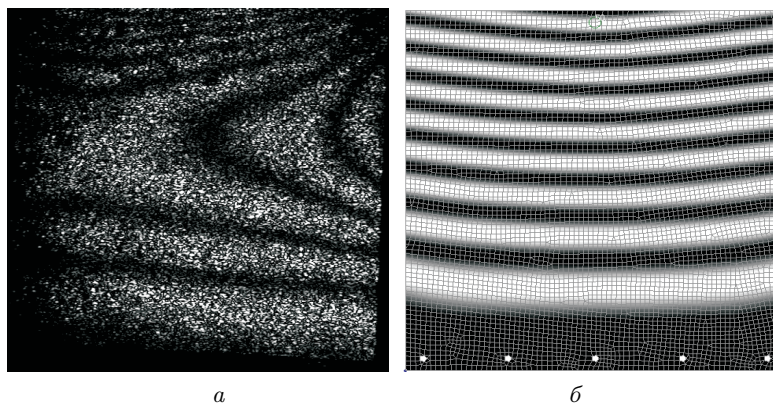


Рис. 2. Характерный вид спекл-интерферограммы смещения рабочей пластины устройства при показании индикатора 2,7 мкм (*а*), расчетная картина полос деформационного перемещения рабочей пластины (*б*)

Для воспроизведения выделенного эффекта неравномерности деформационного перемещения рабочей пластины было создано модельное устройство, где прямоугольная пластина из стеклотекстолита толщиной 1,5 мм, имевшая закрепление по двум противоположным сторонам, нагружалась толкателем микрометрического винта с малым смещением относительно оси симметрии пластины.

На данном образце был выявлен подобный рис. 2, *а* нелинейный характер формирования спекл-интерферограмм (рис. 3), приводящий к трудностям при их расшифровке.

Как показало численное моделирование данного устройства в среде MSC.Nastran (рис. 4), нелинейный характер интерферограмм здесь связан с асимметричностью приложения нагрузки от толкателя.

Достоинством рассмотренного поверочного устройства ОМ-3 является расширение диапазона регулирования задаваемых нагрузочным винтом деформационных перемещений. Однако сложность конструкции применяемой для этого рычажной системы, имеющей несколько ориентированных в разных плоскостях подвижных контактных пар, приводит к возможности неравномерного нагружения рабочей пластины и повышению погрешности устройства в целом.

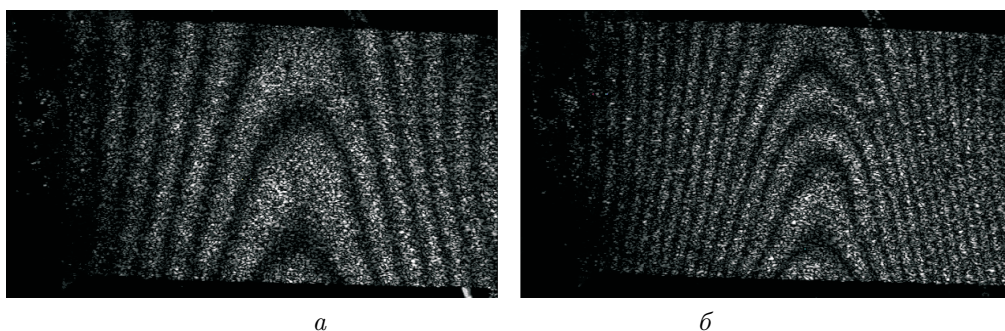


Рис. 3. Спекл-интерферограммы деформации пластины для двух значений перемещения u_z толкателя микрометрического винта:
 $a - u_z = 2,5$ мкм; $b - 5$ мкм

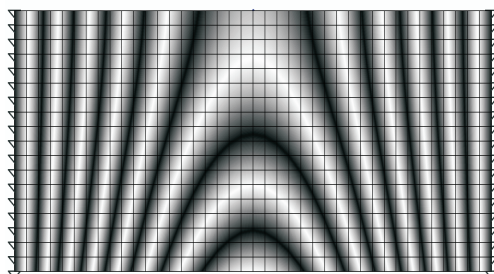


Рис. 4. Результат численного моделирования неравномерного изгиба закрепленной по двум сторонам прямоугольной пластины

Применительно к задачам тестирования мобильных ЦСИ с непрерывным лазером требуется разработка нагрузочного устройства с повышенной жесткостью узла крепления рабочей пластины для возможности размещения на нем пропускающей светорассеивающей пластины диффузора, обеспечивающего выполнение заложенного в [15] принципа повышения помехоустойчивости оптической схемы интерферометра.

3. Описание конструкции и результаты апробационных применений поверочного устройства

Однозначную интерпретацию картин деформационных перемещений из плоскости объекта можно получить на предложенном в работе [16] нагрузочном устройстве с жесткозакрепленной по контуру пластиной. В данном устройстве происходит заведомо известное деформационное перемещение, описываемое уравнением

$$w(x, y) = \int_0^a \int_0^b G(x, y, \xi, \eta) \cdot q(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (10)$$

где $w(x, y)$ — функция прогиба; $G(x, y, \xi, \eta)$ — функция Грина; $q(\xi, \eta)$ — функция, описывающая силовое воздействие; ξ, η — координаты точки приложения силы; a, b — ширина и высота пластины [17].

На основе данного прототипа было создано поверочное устройство, представленное на рис. 5. Устройство содержит силовую рамку 1, состоящую из двух частей, между которыми в специальных пазах закрепляется дюралюминиевая рабочая пластина 2 с характерными размерами $134 \times 155 \times 3$ мм. Зажатие пластины осуществляется симметрично при помощи семи болтов и одной шпильки. Шпилькой на рамке закрепляется специально выполненная мерная стальная пластина 3 толщиной 7 мм с жесткозакрепленным нагрузочным микрометрическим винтом 4.

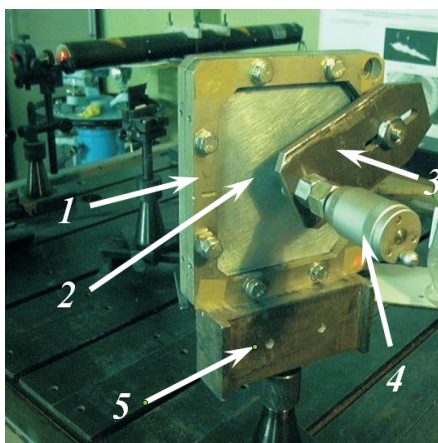


Рис. 5. Общий вид созданного поверочного устройства:

1 — силовая двухсторонняя рамка; 2 — рабочая пластина; 3 — мерная стальная пластина; 4 — микрометрический винт с толкателем; 5 — узел крепления рамки

Консольное размещение микрометрического винта с толкателем 4 на пластине 3 требует учета поправок при задании величины деформационного перемещения рабочей пластины 2. Наличие прогиба мерной стальной пластины 3 приводит к эффекту снижения чувствительности нагрузочного устройства к задаваемым микрометрическим винтом 4 перемещениям. Таким образом, одно деление микрометра после выборки люфтов будет соответствовать прогибу рабочей пластины не на 10 мкм, а на меньшую величину, зависящую от жесткости как рабочей, так и мерной пластин. К достоинствам устройства относится возможность изменения упругих характеристик пластин 2, 3 в малых пределах за счет регулируемого смещения микрометрического винта с толкателем от оси симметрии рабочей пластины (рис. 6).

Более значительные изменения характеристик нагрузочного устройства обеспечивают возможность увеличения площади торцевой поверхности толкателя, например, за счет введения под его торец металлических проставок. Получаемые при этом видоизменения спекл-интерферограмм (рис. 7) связаны с геометрическими размерами, плотностью прилегания, жесткостью металлических проставок.

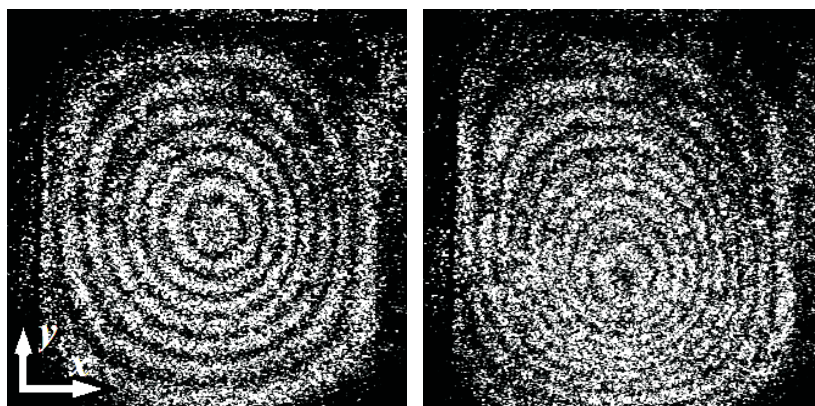


Рис. 6. Характерные спекл-интерферограммы деформаций рабочей пластины для двух положений толкателя:
a — симметричное, $g_{z \max} = 2,52$ мкм; *б* — асимметричное, $g_{z \max} = 3,15$ мкм

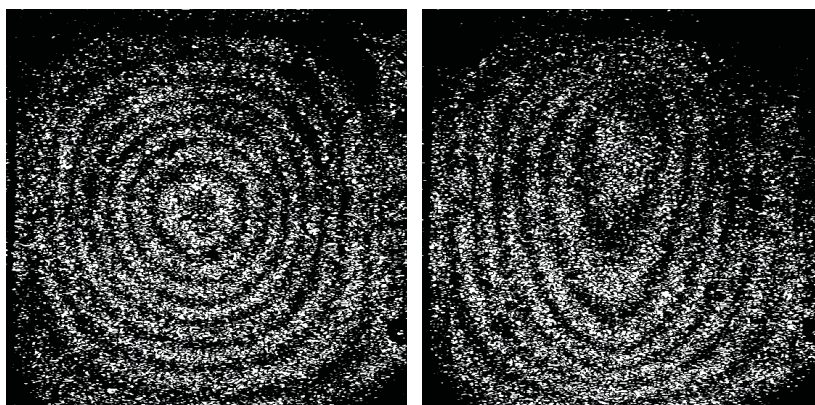


Рис. 7. Видоизменение спекл-интерферограмм деформационных полей перемещения рабочей пластины устройства при одинаковой подвижке толкателя ($u_z = 10$ мкм) с двумя видами металлических проставок:
a — диск диаметром 25 мм и толщиной 1,5 мм; *б* — трубка диаметром 10 мм и длиной 70 мм

Минимальное искажение конфигурации полос спекл-интерферограмм созданного нагрузочного устройства наблюдается при использовании проставок в виде пластинок прямоугольной формы, размеры которых кратны геометрическим параметрам границ рабочей пластины в силовой рамке (рис. 8). Важным фактором, подтверждающим метрологические качества созданного нагрузочного устройства, является отсутствие выхода интерференционных полос на рис. 6–8 на боковую поверхность силовой двухсторонней рамки.

В представленной на рис. 8 интерферограмме число полос $N = 12$, что соответствует деформационному перемещению приосевой части рабочей пластины согласно (9) на $g_z = 3,8$ мкм. При этом коэффициент передачи движения толкателя на рабочую пластину составляет $u_z/g_z = 3,95$. Если толкатель непосредственно контактирует с рабочей пластиной, то коэффициент передачи движения при том

же u_z составляет $\approx 2,26$. В отличие от рассмотренного ранее устройства ОМ-3, созданное нагрузочное устройство характеризуется непостоянным значением коэффициента передачи движения. Отношение u_z/g_z снижается при увеличении величины задаваемого перемещения толкателя.

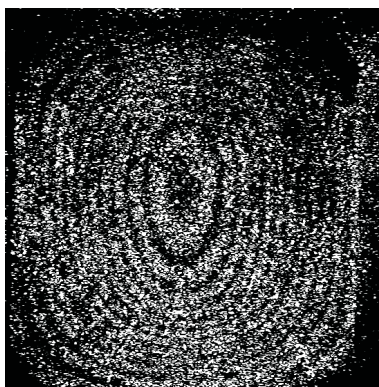


Рис. 8. Спекл-интерферограмма деформационного перемещения рабочей пластины при подвижке толкателя $u_z = 15$ мкм с металлической проставкой в виде прямоугольной пластины с размерами $10 \times 60 \times 12$ мм

Заключение

1. Создание мобильных цифровых спекл-интерферометров с лазером непрерывного действия для определения напряженно-деформированного состояния конструкции требует разработки поверочных устройств с минимальным уровнем люфтовых зазоров и малой ценой деления нагрузочного микрометрического винта в диапазоне перемещений до 10 мкм.

2. Дано описание конструкции разработанного нагрузочного устройства с повышенной жесткостью узла крепления рабочей пластины для возможности размещения оптического элемента интерферометров в виде пропускающей светорассеивающей пластины диффузора, создаваемых по схеме А.И. Жужукина.

3. Исследование разработанного нагрузочного устройства в оптической схеме стационарного ЦСИ подтвердило стабильность получаемых деформационных полей перемещений в диапазоне до 5 мкм.

4. Предложен способ регулирования рабочих характеристик устройства за счет введения металлических проставок под торец толкателя микрометрического винта.

5. Минимальные искажения полос спекл-интерферограмм наблюдаются при использовании проставки в виде металлической пластинки прямоугольной формы, размеры которой кратны геометрическим параметрам рабочей пластины в про свете силовой рамки.

Литература

- [1] Технология сборки и испытаний космических аппаратов / под ред. И.Т. Белякова. М.: Машиностроение, 1990. 552 с.

- [2] Прочностная и вибрационная отработка космических аппаратов / под ред. А.И. Белоусова. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2002. 502 с.
- [3] Конструирование автоматических космических аппаратов / под ред. Д.И. Козлова. М.: Машиностроение, 1996. 448 с.
- [4] Лизин В.Т. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 2003. 448 с.
- [5] Бодин Б.В., Паничкин Н.Г. Основные положения концепции экспериментальной отработки изделий ракетно-космической техники и развития экспериментальной базы ракетно-космической промышленности // Космонавтика и ракетостроение. 2010. № 3(60). С. 8–19.
- [6] Оптические схемы и статистические характеристики сигнала спекл-интерферометров перемещений / Б.Б. Горбатенко [и др.] // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33. № 3. С. 268–280.
- [7] Комаров С.Ю. Помехоустойчивый цифровой спекл-интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени: дис. ... канд. техн. наук. Самара: СГАУ, 2004. 234 с.
- [8] Волков И.В. Спекл-голография в экспериментальной механике: монография. Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. академ., 2010. 199 с.
- [9] Владимиров А.П. Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых тел. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 241 с.
- [10] Th Noiseproof Digital Speckle Pattern Interferometer for Vibration Modes Study to Industrial Demands / O.A. Zhuravliov [et al.] // International Conference on Applications for Image based Measurements (ICAIM). Germany: DANTEC DYNAMICS, 2012.
- [11] Мобильный цифровой спекл-интерферометр с непрерывным лазером для контроля деформационных перемещений элементов конструкции / А.И. Жужукин [и др.] // Краткие сообщения XXXI Российской школы по проблемам науки и технологии. Екатеринбург, 2011. С. 200–205.
- [12] Сергеев Р.Н., Харчигова Ю.В. Мобильный цифровой спекл-интерферометр с непрерывным лазером для регистрации деформационных полей перемещений и дефектоскопии конструкционных материалов // Известия СНЦ РАН. 2012. Т. 14. № 4. С. 216–220.
- [13] Разработка автоматизированного метода исследования вибрационных характеристик энергоустановок / О.А. Журавлев [и др.] // Компьютерная оптика. 2001. № 21. С. 143–149.
- [14] Установка голографическая малогабаритная УГМ-1 (Паспорт Р065.00.000 ПС).
- [15] Жужукин А.И. Патент № 71429 G01H 9/00. Российская Федерация. Устройство для исследования форм колебаний. Опубл. 10.03.2008. Бюл. № 7.
- [16] Сергеев Р.Н. Исследование деформаций пластин с помощью цифрового спекл-интерферометра // VI Самарская конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике: сб. конкурсных докладов. Самара: СФ ФИРАН: Изд-во "Универс групп", 2008. С. 31–37.
- [17] Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. М.: Гостехтеоретиздат, 1956. 419 с.

LOAD DEVICE FOR TESTING MOBILE DIGITAL SPECKLE INTERFEROMETERS OF DEFORMATIVE DISPLACEMENTS

© 2013 O.A. Zhuravlyov, S.Yu. Komarov, R.N. Sergeev²

The problem of working out and creation of verification load device for testing mobile digital speckle-interferometers with the current-wave laser, that provides definition of normal deformation displacements is solved. The analytical expression linking difference in phase of interference fields of strained and initial states of object with an offset value of points of its surface. The results of investigation of strains of plates with different requirements of attaching and loading are given.

Key words: speckle-interferometer, modeling, load device, testing, deformation displacement.

Paper received 31/V/2013.

Paper accepted 31/V/2013.

²Zhuravlyov Oleg Anatolyevich (GuravlevSSAU@yandex.ru), Komarov Sergey Yurievich (sts@e-sam.ru), Sergeev Roman Nikolaevich (romansr@yandex.ru), the Dept. of automatic systems of power plants, Samara State Aerospace University, Samara, 443001, Russian Federation.