

ЧЕРКАШИН
Геннадий Витальевич

УДК 621.791.052:778.38

**ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ
СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

01.02.04 —

механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



00814711 (M)

Работа выполнена в институте

- Научный руководитель: член-корреспондент АН Украины,
доктор технических наук
ЛОБАНОВ Л.М.
- Научный консультант: кандидат физико-математических наук
ПИБТОРАК В.А.
- Официальные оппоненты: член-корреспондент АН Украины, доктор
физико-математических наук; профессор
СОСКИН М.С.
кандидат физико-математических наук,
доцент, КЕПИЧ Т.Ю.
- Ведущая организация: Днепропетровский государственный
университет

Защита состоится "26" сентября 1993 г. в "15.00" часов
на заседании специализированного совета К 068.18.09 в Киевском
университете имени Тараса Шевченко по адресу: 252127, г. Киев,
просп. Глушкова, 6, КГУ, факультет мех.-мат., ауд. 45.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Киевского университета имени Тараса Шевченко.

Автореферат разослан "26" сентября 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физико-математи-
ческих наук, доцент

В. Ковальчук КОВАЛЬЧУК В.Ф.

Актуальность проблемы. На современном этапе развития техники все более широкое применение находят высокомодульные материалы, характеризующиеся высоким коэффициентом отношения модуля упругости к плотности, малым удельным весом при высокой прочности, коррозионной стойкостью, удовлетворительной свариваемостью. Деформации и напряжения, возникающие в процессе изготовления конструкций из таких материалов, оказывают существенное влияние на их работоспособность и надежность. Наличие достоверной информации о напряженно-деформированных состояниях конструкций позволяет оптимизировать технологические процессы их изготовления.

В отличие от традиционно применяемых в аналогичных конструкциях алюминий-магниевого и титанового сплавов, напряженно-деформированные состояния сварных конструкций из высокомодульных материалов еще малоизучены. Недостаточно исследованы остаточные сварочные напряжения и пути их уменьшения, размерная стабильность конструкций при длительной эксплуатации. Это сдерживает более широкое распространение сварных конструкций из высокомодульных материалов.

Трудности анализа этих материалов, обусловленные в первую очередь их повышенной жесткостью и токсичностью, определяют актуальность разработки эффективных, высокоточных, бесконтактных методов исследований и приборных средств на их основе.

Для решения задач оптимизации элементов конструкций и совершенствования технологических процессов их изготовления успешно применяются экспериментальные методы механики деформируемого твердого тела. Широкие возможности в решении этих задач предоставляют современные оптические методы. Значительный вклад в их развитие внесли Е.Б.Александров, А.А.Антонов, А.М.Бонч-Бруевич, Н.Г.Власов, Ч.Вест, Ю.Н.Денисюк, А.Дюрелли, Т.Ю.Кепич, В.А.Жилкин, И.С.Клименко, Л.М.Лобанов, Ю.И.Островский, В.А.Пивторак, В.С.Писарев, У.Райли, А.А.Рассоха, В.И.Савченко, Г.В.Скороцкий, М.С.Соскин, В.П.Щепинов, А.Е.Энос, В.В.Яковлев и многие другие ученые.

Одним из наиболее эффективных экспериментальных методов исследования напряженно-деформированных состояний сварных конструкций является метод голографической интерферометрии, позволяющий измерять одновременно три компоненты вектора перемещений. Благодаря высокой точности и чувствительности, наглядности и информативности

получаемых результатов, возможности бесконтактного определения трехмерных полей перемещений по всей поверхности объектов сложной формы этот метод находит все более широкое применение в различных задачах, связанных с исследованием напряженно-деформированных состояний высокоточных конструкций современной техники. Основное преимущество голографической интерферометрии по сравнению с классической состоит в том, что к исследуемой поверхности не предъявляется специальных требований относительно отражательной способности. То есть отсутствует необходимость шлифовки поверхности, сопровождающейся образованием мелкодисперсной пыли, которая у высокомодульных материалов особотоксична.

Однако широкое применение методов голографической интерферометрии ограничивается громоздкостью оборудования, трудоемкостью экспериментов, недостаточной автоматизацией обработки экспериментальных результатов. Недостатком является также анизотропия чувствительности голографических интерферометров, выражающаяся в относительно низкой точности измерения плоскостных перемещений (u и v) по сравнению с нормальными (w), что снижает точность измерения результирующего вектора. В работах Н.Г.Власова, Ю.И.Островского, Л.М.Плюты, Б.П.Щепинова, В.В.Яковлева и других авторов предложены различные подходы к решению задачи планирования голографического эксперимента. Однако разработать оптические схемы с повышенной точностью измерения u и v или с равной точностью измерения всех трех компонент вектора перемещения на их основе не удалось.

Дальнейшее развитие голографической интерферометрии как направления в экспериментальной механике определяется совершенствованием способов регистрации и анализа интерферограмм, оптимизацией голографических схем, а также созданием портативной аппаратуры для оперативного анализа напряженно-деформированных состояний элементов конструкций в промышленных условиях на различных этапах их изготовления и эксплуатации.

Цель работы - на основе развития метода голографической интерферометрии разработать высокоточный метод исследования напряженно-деформированных состояний элементов сварных конструкций из высокомодульных материалов и провести комплекс исследований деформируемости, размерной стабильности и остаточного напряженного состояния сварных несущих каркасов зеркал крупногабаритной оптики для аэрокосмической техники.

Научная новизна.

Предложен новый подход к решению задачи планирования голографического эксперимента по определению перемещений, на основе которого получены аналитические выражения, связывающие погрешность измерений компонент вектора перемещения с параметрами голографической схемы.

Определены диапазон регулирования точности измерений и величина минимальной погрешности метода.

Выведены соотношения для расчета параметров голографических схем, обеспечивающих заданную точность измерений, на основании которых разработаны и созданы трехголограммные интерферометры для решения задач по исследованию напряженно-деформированных состояний пространственных конструкций.

Предложен голографический способ определения остаточных напряжений и программное обеспечение для автоматизированного вычисления на ЭВМ перемещений и напряжений по интерферограммам.

Разработаны и созданы малогабаритные голографические устройства обеспечивающие проведение измерений напряженного состояния в пространственных конструкциях в условиях их изготовления и эксплуатации.

Выполнены исследования распределения остаточных напряжений и эффективности способов снижения их уровня, деформируемости под нагрузкой и размерной стабильности пространственных сварных элементов крупногабаритной оптики для аэрокосмической техники.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением физически обоснованной модели метода измерений, апробированных математических методов, сравнением результатов тестовых экспериментов с теоретическими решениями для методических задач, а также сопоставлением полученных данных с известными.

Практическая ценность. Разработанные метод и приборные средства предоставляют широкие возможности исследования напряженно-деформированных состояний пространственных сварных конструкций из высоко-модульных материалов. Полученные экспериментальные данные используются для выработки рекомендаций по совершенствованию технологических процессов их изготовления. Результаты работы используются в исследовательской практике ИЭС им.Е.О.Патона АН Украины и внедрены в ГОИ им.С.И.Вавилова.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзных семинарах "Оптико-геометрические методы исследования деформаций и напряжений" (г. Новосибирск, 1985, г. Ми-

асс, 1986), II Республиканской конференции "Надежность и долговечность машин и сооружений" (г. Днепропетровск, 1985), Республиканской конференции "Методы повышения точности изготовления сварных конструкций" (г. Киев, 1986), III Всесоюзном симпозиуме "Технологические остаточные напряжения" (г.Кутаиси, 1988), Международной конференции "Сварные конструкции" (г.Киев, 1990), Всесоюзной конференции "Голография-90" (г. Витебск, 1990), XX-XXII Всесоюзных школах "Физические основы голографии" (г.Черновцы, 1989, г.Тольятти, 1990, г. Переславль-Залесский, 1992), Семинаре кафедры механики сплошных сред Киевского университета им. Тараса Шевченко (г.Киев, 1992), Семинаре сварных конструкций и технической диагностики ИЭС им.Е.О.Патона АН Украины (г. Киев, 1993), Семинаре "Современные проблемы механики" Киевского университета им. Тараса Шевченко (г. Киев, 1993).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в десяти печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Изложена на 113 стр. машинописного текста, содержит 41 иллюстрация, 3 таблицы. Библиография включает 256 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во в в е д е н и и обосновывается актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, рассматриваются научная новизна, достоверность и практическая ценность полученных результатов.

В п е р в о й г л а в е представлен анализ современного состояния экспериментальных методов, применяемых для исследования напряженно-деформированных состояний, рассмотрены тенденции их развития. Приведена характеристика используемых для этой цели методов голографической интерферометрии.

На основе проведенного анализа обосновывается необходимость совершенствования существующих и разработки новых экспериментальных методов с целью повышения точности результатов, снижения трудоемкости исследований и расширения области их применения, создания высокоэффективных методик и портативных приборных средств для исследований напряженно-деформированных состояний пространственных сварных конструкций из высокомодульных материалов в условиях их производства и эксплуатации.

Вторая глава посвящена теоретическому анализу точности измерения компонент пространственного вектора перемещения методом голографической интерферометрии, исследованию возможности ее регулирования, а также разработке и оптимизации голографических схем интерферометров для решения задач по исследованию напряженно-деформированных состояний пространственных сварных конструкций из высокомодульных материалов.

Суть метода заключается в сравнении волновых фронтов когерентного излучения, рассеянного поверхностью исследуемого объекта до и после его деформирования. Способы расшифровки получаемых интерферограмм (систем интерференционных полос) основаны на соотношении Александра Е.Б. и Бонч-Бруевича А.М., связывающего суммарный сдвиг фаз δ (порядок интерференции K) волн, рассеянных точками поверхности объекта в исходном и деформированном положениях, с векторами их перемещений:

$$\delta = \frac{2}{\lambda} \pi \cdot \Delta \vec{r} \cdot (\vec{\rho}_0 + \vec{\rho}_H) = 2 \cdot \pi \cdot K, \quad (1)$$

где $\Delta \vec{r}$ - вектор перемещения точки объекта между экспозициями, $\vec{\rho}_0$ - орт нормали к фронту освещающей волны в точке, $\vec{\rho}_H$ - орт направления наблюдения, λ - длина волны используемого излучения.

Для определения трехмерного вектора перемещения необходима регистрация как минимум трех интерференционных картин. Наиболее часто эта задача решается методом трех голограмм. В тех случаях, когда одна или две компоненты вектора перемещений известны или не представляют интереса, используются упрощенные (соответственно двух- и одноголограммные) схемы.

В трехмерной постановке для определения компонент вектора перемещения решается система уравнений

$$\Delta \vec{r} \cdot (\vec{\rho}_0 + \vec{\rho}_i) = \lambda \cdot K_i \quad (i=1,2,3),$$

где ρ_i - орт наблюдения исследуемой точки, а K_i - порядок интерференционной полосы в этой точке при наблюдении с i -й голограммы. В декартовой прямоугольной системе координат эти уравнения принимают следующий вид:

$$[A] \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$, u , v и w - проекции вектора перемещения на оси X , Y и Z .

Матрица чувствительности $[A]$ характеризует оптическую схему

голографического интерферометра. Для точечного источника освещения ее элементы могут быть выражены через координаты элементов оптической схемы следующим образом:

$$a_{t1} = (x - x_0)/R_0 + (x - x_t)/R_t,$$

$$a_{t2} = (y - y_0)/R_0 + (y - y_t)/R_t,$$

$$a_{t3} = (z - z_0)/R_0 + (z - z_t)/R_t,$$

где x, y, z - координаты исследуемой точки, x_0, y_0, z_0 - координаты источника освещения, x_t, y_t, z_t - координаты центра t -й голограммы, $R_0 = ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2)^{1/2}$,

$$R_t = ((x - x_t)^2 + (y - y_t)^2 + (z - z_t)^2)^{1/2}.$$

Точность определения компонент u, v и w зависит от точности измерения координат исследуемой точки, источника освещения и голограмм, а также порядков интерференции в исследуемой точке на интерферограммах. Для упрощения дальнейших выкладок приняты следующие обозначения:

$$\xi_1 = K_1, \xi_2 = K_2, \xi_3 = K_3, \xi_4 = x_0, \xi_5 = x_1, \xi_6 = x_2, \xi_7 = x_3, \xi_8 = x, \\ \xi_9 = y_0, \xi_{10} = y_1, \xi_{11} = y_2, \xi_{12} = y_3, \xi_{13} = y, \xi_{14} = z_0, \xi_{15} = z_1, \\ \xi_{16} = z_2, \xi_{17} = z_3, \xi_{18} = z.$$

Погрешность измерения σ_f некоторой функции $f(\xi)$ восемнадцатимерного вектора ξ с компонентами ξ_α может быть определена следующим образом:

$$\sigma_f = \left(\sum_{\alpha=1}^{18} \left(\frac{\partial f}{\partial \xi_\alpha} \cdot \sigma_{\xi_\alpha} \right)^2 \right)^{1/2}.$$

где σ_{ξ_α} - погрешность измерения величины ξ_α .

Погрешности измерения компонент u, v и w запишутся в виде:

$$\sigma_u = \left(\sum_{\alpha=1}^{18} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi_\alpha} \cdot \sigma_{\xi_\alpha} \right)^2 \right)^{1/2}, \\ \sigma_v = \left(\sum_{\alpha=1}^{18} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi_\alpha} \cdot \sigma_{\xi_\alpha} \right)^2 \right)^{1/2}, \\ \sigma_w = \left(\sum_{\alpha=1}^{18} \left(\frac{\partial w}{\partial \xi_\alpha} \cdot \sigma_{\xi_\alpha} \right)^2 \right)^{1/2}. \quad (3)$$

После представления решений системы (2) в виде: $u = \Delta_1 / \Delta$, $v = \Delta_2 / \Delta$, $w = \Delta_3 / \Delta$, где $\Delta = \det[A]$,

$$\Delta_1 = \det \begin{bmatrix} \lambda K_1 a_{12} a_{13} \\ \lambda K_2 a_{22} a_{23} \\ \lambda K_3 a_{32} a_{33} \end{bmatrix}, \Delta_2 = \det \begin{bmatrix} a_{11} \lambda K_1 a_{13} \\ a_{21} \lambda K_2 a_{23} \\ a_{31} \lambda K_3 a_{33} \end{bmatrix}, \Delta_3 = \det \begin{bmatrix} a_{11} a_{12} \lambda K_1 \\ a_{21} a_{22} \lambda K_2 \\ a_{31} a_{32} \lambda K_3 \end{bmatrix},$$

выражения (3) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}\sigma_u &= \frac{1}{\Delta^2} \cdot \left(\sum_{\alpha=1}^{18} \left(-\frac{\partial \Delta_1}{\partial \xi_\alpha} \cdot \Delta - \frac{\partial \Delta}{\partial \xi_\alpha} \cdot \Delta_1 \right)^2 \cdot \sigma_{\xi_\alpha}^2 \right)^{1/2}, \\ \sigma_v &= \frac{1}{\Delta^2} \cdot \left(\sum_{\alpha=1}^{18} \left(-\frac{\partial \Delta_2}{\partial \xi_\alpha} \cdot \Delta - \frac{\partial \Delta}{\partial \xi_\alpha} \cdot \Delta_2 \right)^2 \cdot \sigma_{\xi_\alpha}^2 \right)^{1/2}, \\ \sigma_w &= \frac{1}{\Delta^2} \cdot \left(\sum_{\alpha=1}^{18} \left(-\frac{\partial \Delta_3}{\partial \xi_\alpha} \cdot \Delta - \frac{\partial \Delta}{\partial \xi_\alpha} \cdot \Delta_3 \right)^2 \cdot \sigma_{\xi_\alpha}^2 \right)^{1/2}.\end{aligned}\quad (4)$$

Для большинства голографических интерферометров погрешность измерения координат значительно меньше расстояний от поверхности исследуемого объекта до источника освещения и голограмм. Анализ выражений (4) показал, что в этом случае погрешность измерений, вызванная неточностью определения порядка интерференции, значительно превышает влияние неточности измерения координат. Для этого случая получена более простая система уравнений:

$$\begin{aligned}\sigma_u &= \frac{\lambda}{|\Delta_1|} \cdot \sigma_K \cdot S_u, \\ \sigma_v &= \frac{\lambda}{|\Delta_1|} \cdot \sigma_K \cdot S_v, \\ \sigma_w &= \frac{\lambda}{|\Delta_1|} \cdot \sigma_K \cdot S_w,\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\text{где } S_u &= ((a_{22}a_{33} - a_{32}a_{23})^2 + (a_{32}a_{13} - a_{12}a_{33})^2 + (a_{12}a_{23} - a_{22}a_{13})^2)^{1/2}, \\ S_v &= ((a_{31}a_{23} - a_{21}a_{33})^2 + (a_{11}a_{33} - a_{31}a_{13})^2 + (a_{21}a_{13} - a_{11}a_{23})^2)^{1/2}, \\ S_w &= ((a_{21}a_{32} - a_{31}a_{22})^2 + (a_{31}a_{12} - a_{11}a_{32})^2 + (a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12})^2)^{1/2}.\end{aligned}$$

Проведен анализ влияния геометрии оптической схемы на величины σ_u , σ_v и σ_w . Показано, что при постоянных λ и σ_K перемещения фотопластинок и источника излучения вдоль направлений наблюдения и освещения не сказываются на точности измерений интерферометра. При этом необходимо учитывать, что по мере удаления регистрирующей среды от исследуемого объекта снижается разрешение интерференционных полос. Это в свою очередь может привести к некоторому увеличению погрешности σ_K и соответствующему снижению точности метода для больших Rl .

Определены границы применимости упрощенных выражений (5). Показано, что различие выражений (5) и (4) составляет менее 1% при условии $\sigma_{\xi_\alpha} / \xi_\alpha < 0.02$ ($\alpha \neq 1, 2, 3$). (6)

Так, например, если точность измерения координат составляет 1 мм, то для интерферометров размером более 5 см погрешность измерений определяется выражениями (5) с точностью свыше 1%. Для малогабаритных схем при значительном приближении регистрирующих фотопластинок и источника освещения к исследуемому объекту условие (6) может нарушиться. В этих случаях применяются выражения (4). В малогабаритных голографических интерферометрах отклонения координат элементов оптической схемы от расчетных вносят существенный вклад в погрешность измерений. Последнее обстоятельство должно учитываться при разработке и изготовлении портативных голографических измерительных приборов.

Использование полученных аналитических выражений для σ_u , σ_v и σ_w позволяет разрабатывать оптические схемы голографических интерферометров с наперед заданной точностью измерения отдельных компонент вектора перемещения. Рассмотрим векторы $\vec{a}(a_{11}, a_{21}, a_{31})$, $\vec{b}(a_{12}, a_{22}, a_{32})$ и $\vec{c}(a_{13}, a_{23}, a_{33})$, построенные в некотором ортонормированном базисе. Для обеспечения заданной величины погрешности σ измерения одной из компонент, например u (т. е. выполнения условия $\sigma_u = \sigma$), необходимо использовать оптические схемы, для которых $|\vec{a}| = \sigma_K \cdot \lambda / \sigma$. Аналогично поступают при определении компонент v , v и w , заменяя $|\vec{a}|$ на $|\vec{b}|$ и $|\vec{c}|$ соответственно.

Определен возможный диапазон регулирования погрешности:

$$\sigma_{\min} \leq \sigma < \infty,$$

где $\sigma_{\min} = \sigma_K \cdot \lambda / \sqrt{p}$, p - количество голограмм. Причем σ_{\min} достигается в том случае, когда источник освещения, голограммы и исследуемый объект расположены на одной оси. Освещая объект сквозь голограмму можно получить максимальная точность измерений составляющей вектора перемещений параллельной оптической оси интерферометра. Так известная схема Ю.Н. Денисюка, применяемая в изобразительной голографии, обеспечивает максимальную точность измерений компоненты w .

Исследована также возможность построения голографических интерферометров, обеспечивающих равноточное измерение компонент вектора перемещения $\sigma_u = \sigma_v = \sigma_w$. Получена система уравнений, корни которой являются углами между координатными осями и направлениями освещения и наблюдения для оптической схемы, характеризующейся минимальной резкой погрешностью измерения всех трех компонент вектора перемещений:

$$\begin{aligned}
& 3(\cos^2\varphi_0 - \cos^2\theta_0) + \cos^2\varphi_1 + \cos^2\varphi_2 + \cos^2\varphi_3 + 2\cos\varphi_0(\cos\varphi_1 + \cos\varphi_2 + \\
& + \cos\varphi_3) - \cos^2\theta_1 - \cos^2\theta_2 - \cos^2\theta_3 - 2(\cos\theta_1 + \cos\theta_2 + \cos\theta_3) = 0, \\
& 3(\cos^2\theta_0 - \cos^2\varphi_0) + \cos^2\theta_1 + \cos^2\theta_2 + \cos^2\theta_3 + 2\cos\theta_0(\cos\theta_1 + \cos\theta_2 + \\
& + \cos\theta_3) - \cos^2\varphi_1 - \cos^2\varphi_2 - \cos^2\varphi_3 - 2(\cos\varphi_1 + \cos\varphi_2 + \cos\varphi_3) = 0, \\
& 3\cos\varphi_0\cos\theta_0 + \cos\varphi_1\cos\theta_1 + \cos\varphi_2\cos\theta_2 + \cos\varphi_3\cos\theta_3 + \cos\varphi_0(\cos\theta_1 + \\
& + \cos\theta_2 + \cos\theta_3) + \cos\theta_0(\cos\varphi_1 + \cos\varphi_2 + \cos\varphi_3) = 0, \quad (7) \\
& 3\cos\theta_0\cos\varphi_0 + \cos\theta_1\cos\varphi_1 + \cos\theta_2\cos\varphi_2 + \cos\theta_3\cos\varphi_3 + \cos\theta_0(\cos\varphi_1 + \\
& + \cos\varphi_2 + \cos\varphi_3) + \cos\varphi_0(\cos\theta_1 + \cos\theta_2 + \cos\theta_3) = 0, \\
& 3\cos\varphi_0\cos\theta_0 + \cos\varphi_1\cos\theta_1 + \cos\varphi_2\cos\theta_2 + \cos\varphi_3\cos\theta_3 + \cos\varphi_0(\cos\theta_1 + \\
& + \cos\theta_2 + \cos\theta_3) + \cos\theta_0(\cos\varphi_1 + \cos\varphi_2 + \cos\varphi_3) = 0.
\end{aligned}$$

где φ_0, θ_0 - углы орта освещения с осями X, Y, Z соответственно, φ_i, θ_i - углы с осями X, Y, Z i-го орта наблюдения. Система (7) недоопределена, однако применение численных методов позволяет находить ее решения.

Исходя из полученных общих соотношений для метода трех голограмм выведены выражения для оценки погрешности измерений при использовании двух- и одноголограммных интерферометров.

Для двухголограммных схем:

$$\sigma_u = \frac{\lambda}{|\Delta l|} \cdot \sigma_K (a_{11}^2 + a_{21}^2)^{1/2}, \quad \sigma_v = \frac{\lambda}{|\Delta l|} \cdot \sigma_K (a_{12}^2 + a_{22}^2)^{1/2}.$$

Для интерферометров с одной голограммой: $\sigma_u = \sigma_K \cdot \lambda / a_{11}$.

На основании общих зависимостей (4) можно также получить выражения и для других голографических методов. В качестве примера проанализирован компенсационный голографический метод, предполагающий измерение вектора перемещения посредством регистрации одной голограммы реального времени. Для компонент вектора перемещения получены следующие выражения:

$$\sigma_u = \frac{\lambda}{a_{11}^{(2)} - a_{11}^{(1)}} \cdot \sigma_{\Delta K}, \quad \sigma_v = \frac{\lambda}{a_{12}^{(2)} - a_{12}^{(1)}} \cdot \sigma_{\Delta K}, \quad \sigma_w = \frac{\lambda}{a_{13}^{(2)} - a_{13}^{(1)}} \cdot \sigma_{\Delta K}.$$

где $a_{ij}^{(1)}$ и $a_{ij}^{(2)}$ - коэффициенты, определяемые параметрами оптической схемы для точек (1) и (2), между которыми подсчитывается количество интерференционных полос ΔK при компенсации соответствующих компонент вектора перемещения.

Выражения для метода расшивки по относительным порядком

полос получают простой заменой элементов a_{ij} на соответствующие элементы матрицы чувствительности для этого метода.

В таблице представлены варианты оптических схем голографических интерферометров с различной точностью измерения компонент вектора перемещения.

X	$\cos\theta_0$	0.755	0.999	0.012	0.879	0.450	-0.656	0.572
	$\cos\theta_1$	0.645	0.900	-0.604	0.165	-0.850	-0.499	0.549
	$\cos\theta_2$	0.781	0.900	0.135	-0.321	0.707	0.846	-0.902
	$\cos\theta_3$	0.10	0.650	-0.093	-0.253	0.425	-0.396	0.391
Y	$\cos\psi_0$	0.655	0.000	-0.999	0.458	0.450	0.319	0.368
	$\cos\psi_1$	-0.745	0.435	-0.452	-0.485	0.425	-0.862	-0.822
	$\cos\psi_2$	0.554	-0.435	-0.988	0.887	0.707	-0.169	0.071
	$\cos\psi_3$	0.912	0.000	-0.995	0.661	-0.850	0.918	0.921
Z	$\cos\theta_0$	0.031	0.045	0.038	0.133	0.771	0.684	0.733
	$\cos\theta_1$	0.170	0.028	0.657	0.859	0.311	0.010	0.151
	$\cos\theta_2$	0.288	0.028	0.061	0.332	0.017	0.506	0.426
	$\cos\theta_3$	0.012	0.760	0.029	0.706	0.311	0.001	0.002
РАСЧЕТНЫЕ	σ_x , мкм	0.040	0.026	0.362	0.277	0.050	0.049	0.049
	σ_y , мкм	0.040	0.102	0.030	0.047	0.050	0.049	0.049
	σ_w , мкм	0.220	0.102	0.362	0.277	0.050	0.049	0.049

С целью апробации полученных выражений проведены эксперименты по определению отклонений измеренных перемещений от расчетных для пластины при ее повороте вокруг неподвижной оси. Выполненные на методических образцах эксперименты продемонстрировали хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными значениями и подтвердили высокую точность измерений.

В третьей главе представлены способ определения остаточных напряжений и малогабаритные голографические устройства для исследований пространственных конструкций в промышленных условиях.

От известных способов определения напряжений в объекте по деформации его поверхности в результате изъятия некоторого объема

материала предложенный способ отличается тем, что регистрируется голографическое изображение полученного отверстия. В результате на одной интерферограмме оказываются зарегистрированы все необходимые для расшифровки данные и отпадает необходимость дополнительных достаточно трудоемких и нежелательных из-за высокой токсичности исследуемого материала измерений на поверхности объекта.

Согласно предложенному способу определения остаточных напряжений исследуемый участок конструкции освещают когерентным излучением и рассеянное поверхностью излучение регистрируют на голограмме (первая экспозиция). Затем в объекте выполняют отверстие и повторно регистрируют рассеянное поверхностью излучение на той же голограмме с тем же временем экспозиции (вторая экспозиция). После этого наблюдаемый участок поверхности, за исключением отверстия, закрывают непрозрачным экраном и в третий раз экспонируют ту же голограмму (третья экспозиция). При этом не требуется совпадения времени третьей экспозиции и первых двух. Оно определяется отражательными свойствами поверхности отверстия.

Полученное таким образом голографическое изображение восстанавливают и наблюдают через оптический измерительный прибор, например, координатный микроскоп. На восстановленном изображении определяют геометрические параметры отверстия, количество и конфигурацию интерференционных полос вокруг него. Расшифровка полученной информации осуществляется с использованием основного соотношения голографической интерферометрии (1) и известных выражений механики деформируемого твердого тела для напряженного слоя с отверстием.

Различными авторами получено несколько функций вида $f(\sigma) = K$, отличающихся в зависимости от типа выполненного отверстия (сквозное или глухое), его формы, а также от принятого допущения о виде напряженного состояния. В рамках известных моделей предполагается, что процесс выполнения отверстия является идеальным и не вносит искажений в результаты измерений. То есть для $\sigma = 0$ интерференционные полосы вокруг отверстия должны отсутствовать ($K = 0$). Проведенные эксперименты на ненапряженных образцах показали, что вокруг отверстий наблюдаются интерференционные полосы, представляющие собой систему концентрических колец. Таким образом в процессе сверления исследуемого изделия возникают дополнительные неучитываемые существующими моделями деформации, искажающие результаты измерений.

Обнаруженная систематическая погрешность измерений устраняется путем введения в разрешающее уравнение дополнительного члена вида $W = \Delta \cdot e^{-\alpha(r-a)}$, где a — радиус высверленного отверстия, r — расстояние исследуемой точки от центра отверстия. Коэффициент α характеризует скорость затухания возмущения в исследуемом материале. Величина перемещения кромки отверстия Δ зависит от способа и качества выполнения отверстия. Для определения величины этих дополнительных деформаций описанным выше способом получена серия голографических интерферограмм, характеризующих деформации поверхности вблизи отверстия для ненапряженных образцов. В качестве объектов исследований использовались образцы материалов типа АБМ, АМг и высокопрочных сталей различной твердости. Получены результаты для дополнительных перемещений в зависимости от твердости исследуемого материала и диаметра отверстия.

Разработано программное обеспечение для ПЭВМ типа IBM/PC, с помощью которого выполнено моделирование интерференционных картин для различных величин α и Δ . Анализ полученных интерферограмм показал, что для конструкций с невысоким уровнем остаточных напряжений дополнительный член W в разрешающем уравнении может достигать значительных величин и качественно изменять картину интерференционных полос вокруг отверстия при неизменных остаточных напряжениях. Расшифровка интерферограммам без учета этого члена сопровождалась бы значительными погрешностями.

Для оперативного измерения остаточных напряжений в конструкциях различной пространственной ориентации в условиях их производства и эксплуатации разработан ряд малогабаритных голографических устройств, способных выполнять измерения в вертикальном и горизонтальном положениях. Для определения остаточных напряжений в конструкциях сложной геометрии созданы универсальные голографические модули (рис.1). Благодаря специальной конструкции неподвижного основания, устанавливаемого на исследуемый объект, и узла для позиционирования съемного корпуса с голографическим интерферометром они способны выполнять измерения остаточных напряжений в различных пространственных положениях.

С применением созданных малогабаритных голографических устройств измерения остаточных напряжений могут выполняться в промышленных условиях, и не требуется доставка исследуемой конструкции в голографическую лабораторию.

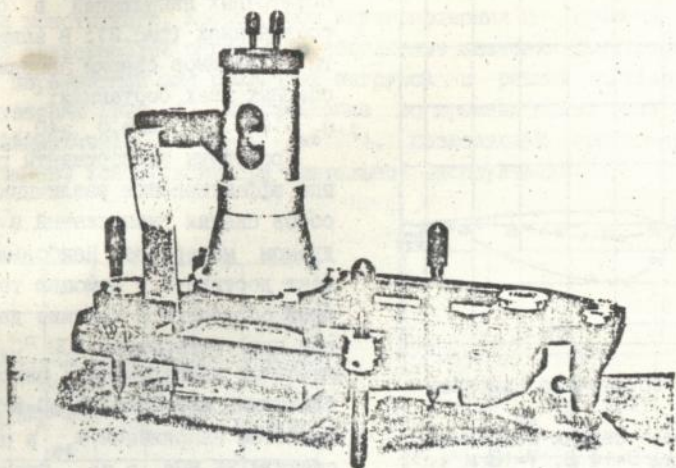


Рис.1. Малогабаритное голографическое устройство для определения остаточных напряжений в пространственных конструкциях.

В четвертой главе представлены результаты выполненных исследований напряженно-деформированных состояний сварных несущих каркасов крупногабаритных оптических элементов из высокомодульного материала типа АБМ.

Известно, что при сварке материалов этого типа в результате термической диффузии происходит перераспределение содержащегося в них бериллия в пределах зоны, находящейся в твердо-жидком состоянии. Результатом этого процесса является обогащение сварного шва бериллием с максимальной концентрацией ($\sim 75\%$) вдоль линии сплавления. Для учета этого явления выполнены исследования механических свойств в различных зонах сварного соединения. Установлено, что модуль упругости изменяется от 140 МПа в основном металле до 250 МПа вдоль линии сплавления. Твердость изменяется соответственно от 100 НV до 200 НV.

С учетом влияния этого фактора на величину перемещений поверхности вблизи отверстия разработано программное обеспечение для автоматизированного вычисления на ПЭВМ типа ДВК и IBM/PC остаточных напряжений в различных зонах сварных соединений материала типа АБМ по данным голографических измерений.

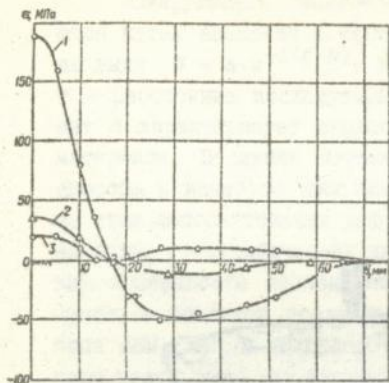


Рис.2. Остаточные напряжения σ_{xx} (1,2) и σ_{yy} (3):
 ○ - после сварки на режиме $I=600$ А, $U=14$ В, $V=18$ м/ч.
 ▲ - после сварки и отжига при 400° С.

исследованы распределения остаточных напряжений в сварных соединениях (рис.2). В зависимости от режимов сварки напряжения в сварных швах составили:

$$\sigma_{xx} = 160 \dots 210 \text{ МПа}, \sigma_{yy} = 40 \dots 60 \text{ МПа}.$$

Проведены эксперименты по оценке эффективности различных способов снятия напряжений в исследуемом материале. Наибольший эффект достигнут с помощью термической обработки в течение двух часов при температуре 400° С. В проведенных экспериментах напряжения снизились примерно на 80 % (рис.2). При этом напряжения σ_{xx} в шве составили 36 МПа, а σ_{yy} практически полностью исчезли.

На основе разработанных в главе 2 трехголограммных оптических схем созданы интерферометры, с помощью которых зарегистрированы интерферограммы, характеризующие деформации исследуемого сварного каркаса при его нагружении весовыми имитаторами. Выполнены измерения компонент векторов перемещений базовых поверхностей, к которым в условиях эксплуатации крепятся зеркала объектива. Эксперименты проведены для различной ориентации конструкции относительно направления действия силы. Максимальные перемещения базовых поверхностей составили: $u = -3,1$ мкм, $v = -21,5$ мкм, $w = 4,2$ мкм.

Выполнены исследования размерной стабильности сварных конструкций в условиях нагружений, имитирующих эксплуатационные. В связи с необходимостью высокоточных измерений в течение длительных промежутков времени, предварительно исследовано влияние колебаний температуры окружающей среды на точность интерферометра. В результате испытаний на размерную стабильность установлено, что скорость деформирования конструкции с течением времени t убывает по экспоненциальному закону (рис.3). При этом компоненты вектора скорости относительного смещения базовых поверхностей достаточно хорошо описываются функциями вида $F = a \cdot e^{-b \cdot t}$, где a и b — коэф-

эффициенты, определяемые условиями нагружения и механическими свойствами конструкции. Посредством интегрирования по времени полученных зависимостей определены абсолютные значения компонент векторов перемещений для различных нагрузок и разной длительности эксплуатации (рис. 4). Их изменение во времени может быть описано функцией вида $P = \frac{a}{b}(1 - e^{-b \cdot t})$, позволяющей прогнозировать перемещения конструкции при длительной эксплуатации.

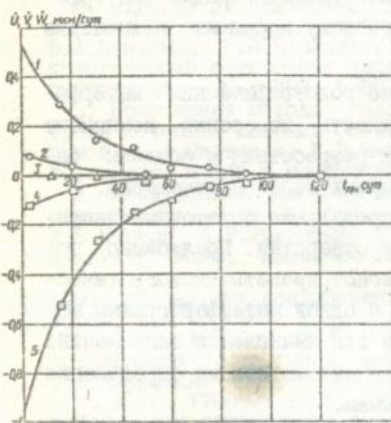


Рис.3. Компоненты \dot{u} (1,2), \dot{v} (3) и \dot{w} (4,5) скорости относительно смещения базовых поверхностей нагружение весовыми имитаторами малого (1,3,5) и большого (2,3,4) зеркал объектива.

Анализ полученных результатов показал, что деформирование конструкции происходит в основном в течение первых двух месяцев (около 90% изменения размеров) и через четыре месяца практически прекращается. При этом суммарные относительные перемещения зеркал исследуемого объектива не превышают 35 мкм, что соответствует предъявляемым техническим требованиям.

В з а к л ю ч е н и и сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, состоящие в следующем:

1. Предложен способ планирования голографического эксперимента, состоящий в минимизации разности погрешностей измерения отдельных компонент вектора перемещения, на основе которого разра-

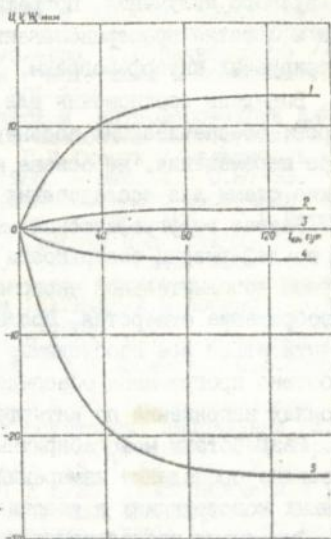


Рис.4. Компоненты вектора перемещения w (1,2), u (3), v (4,5)

ботаны методические основы определения пространственного расположения элементов голографических схем, лишенных анизотропии чувствительности.

2. В результате проведенного анализа разрешающих уровней метода голографической интерферометрии получены аналитические выражения, связывающие погрешности измерений компонент вектора перемещения с параметрами голографической схемы. Определен диапазон регулирования точности метода. Установлено, что величина минимальной погрешности измерений прямо пропорциональна длине волны используемого излучения, погрешности измерения порядка интерференции и обратно пропорциональна квадратному корню из количества регистрируемых интерферограмм.

3. Выведены соотношения для расчета голографических интерферометров, обеспечивающих заданную точность измерений компонент вектора перемещения, на основе которых разработаны и созданы оптические схемы для исследования трехмерных полей перемещений.

4. Развита голографический метод определения остаточных напряжений по деформации поверхности вокруг отверстия. Предложено посредством дополнительной экспозиции регистрировать голографическое изображение отверстия, после чего с одной интерферограммы могут считываться все необходимые данные для вычисления напряжений. Разработано программное обеспечение для автоматизации определения остаточных напряжений по интерферограммам.

5. Разработаны малогабаритные голографические устройства, обеспечивающие проведение измерений напряженного состояния в пространственных конструкциях в условиях их изготовления и эксплуатации.

6. Выполнены исследования напряженно-деформированных состояний пространственных сварных элементов крупногабаритной оптики из материала АБМ. Выявлены особенности распределения остаточных напряжений для различных режимов сварки. Определено, что с помощью термической обработки в течение двух часов при температуре 400 °С уровень напряжений может быть снижен на 80 %. Установлено, что с течением времени скорость самопроизвольного деформирования сварных элементов уменьшается по экспоненциальному закону. Через 3000 часов изменения размеров практически прекращаются. Предложены соотношения, описывающие изменения компонент вектора перемещения во времени.

7. Разработанные голографические интерферометры, голографический способ определения остаточных напряжений и малогабаритные голографические устройства внедрены в ГОИ им. С. И. Вавилова для исслед-

дований напряженно-деформированных состояний пространственных сварных конструкций из высокомодульных материалов на различных стадиях изготовления.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Черкашин Г.В. Регулирование точности измерения перемещений методом трех голограмм при контроле размерной стабильности сварных изделий // Автомат. сварка. - 1987. - № 2. - С. 47-49.
2. Влияние пластических деформаций в области зондирующего отверстия на точность измерения остаточных сварочных напряжений / В.А.Пивторак, Г.В.Черкашин, Т.Г.Шубладзе, Г.С.Вачиберадзе // Технологические остаточные напряжения / Материалы III Всесоюзного симпозиума. - М.: ИПМ, 1988. - С. 305-310.
3. Применение метода голографической интерферометрии для контроля качества сварных соединений и элементов конструкций / Л.М.Лобанов, В.А.Пивторак, Г.В.Черкашин, Г.И.Ткачук // Надежность и долговечность машин и сооружений. - 1988. - Вып.14. - С.87-93.
4. Исследование напряженно-деформированного состояния пространственных сварных конструкций из сплава АБМ / Г.В.Черкашин, И.В.Киянец, А.Р.Романенко и др. // Сварные конструкции. Тез. докл. Междунар. конф., Киев, 24-28 сент. 1990 г. - Киев: ИЭС. - С.74-75.
5. Определение голографическим методом остаточных напряжений в стыковых сварных соединениях стали 12Х2Н4МД / Л.М.Лобанов, В.А.Пивторак, Г.В.Черкашин и др. // Автомат. сварка. - 1991. - № 1. - С.26-29.
6. А. с. 1696843 СССР, МКИ⁵ G 01 B 5/30. Голографический способ определения остаточных напряжений / Л.М.Лобанов, В.А.Пивторак, Г.В.Черкашин. - Опубл. 07.12.91, Бюл. N 45.
7. А. с. 1768927 СССР, МКИ⁵ G 01 B 5/30. Голографическое устройство для определения внутренних остаточных напряжений / Л.М.Лобанов, А.А.Антонов, В.А.Пивторак, С.Г.Андрущенко, Г.В.Черкашин, Г.Н.Чернышев, В.М.Козинцев. - Опубл. 15.10.92, Бюл. N 38.
8. А. с. 1768928 СССР, МКИ⁵ G 01 B 5/30. Голографическое устройство для определения внутренних остаточных напряжений / Л.М.Лобанов, В.А.Пивторак, Г.В.Черкашин, С.Г.Андрущенко. - Опубл. 15.10.92, Бюл. N 38.
9. Остаточные напряжения в сварных соединениях материала типа АБМ / Л.М.Лобанов, В.А.Пивторак, Г.В.Черкашин и др. // Автомат. сварка. - 1992. - № 7-8. - С. 3-5.
10. Holographic method of residual stress measurement in structural members / L.M.Lobanov, V.A.Pivtorak, G.V.Cherkashin, S.G.Andrushchenko // Measurement and inspection in industry by computer aided laser metrology: Abstract of symposium, Balatonfured, Hungary, september 24-27, 1990. - P.23-24.

Подп. в печ. 23.04.93. Формат 60x84/16. Бум. офс. № 2. Офс. печ. Усл.печ.л. 0,93. Усл.кр.-отт. I,16. Уч.-изд.л. 0,95. Тираж 100 экз. Зак. 281р. Бесплатно.

ИЭС им.Е.О.Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.
ПОП ИЭС им.Е.О.Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.

AB 27.221