

УДК 624.012.46

*ПОПОВ АНАТОЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
47604@mail.ru*

*ЗИНОВЬЕВ ВЛАДИМИР БОРИСОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
vbinoviev@mail.ru*

*ГЕРАСИМОВ СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
strmech@sgups.stu.ru*

*СПОДАРЕВА ЛЮБОВЬ АНАТОЛЬЕВНА, канд. физ.-мат. наук, доцент,
laspod@mail.ru*

*Сибирский государственный университет путей сообщения,
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ВО ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ

Рассмотрена оптическая схема записи голограмм во встречных пучках с использованием высокочастотных (порядка 1000 линий/мм) рабочих растров. Получены разрешающие уравнения для картин полос, наблюдаемых в проходящем и отраженном голограммой свете. Приводятся результаты исследования опорной части моста из стеклопластика. Проведенное исследование позволило не только установить значительные различия экспериментальных данных и данных, полученных конечно-элементным расчетом, но и найти причину этих различий.

Ключевые слова: мост; перемещения; деформации; голографическая интерферометрия; голографический муар; опорная часть; стеклопластик.

*ANATOLIY M. POPOV, DSc, Professor,
47604@mail.ru*

*VLADIMIR B. ZINOV'EV, PhD, A/Professor,
vbinoviev@mail.ru*

*SERGEY I. GERASIMOV, DSc, Professor,
strmech@sgups.stu.ru*

*LYUBOV A. SPODAREVA, PhD, A/Professor,
laspod@mail.ru*

*Siberian State Transport University,
191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia*

EXAMINATION OF BRIDGE ELEMENTS USING HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY IN COLLIDING BEAMS

The paper considers the optical schematic for hologram recording in colliding beams using high-frequency (about 1000 lines/mm) scan patterns. Equations are suggested for band patterns observed in transmitted- and reflected-light holography. The results are obtained for fiberglass bridge supports. This research allows not only to determine the significant difference between experimental and finite element calculations, but also to determine its origins.

Keywords: bridge; displacement; strain; holographic interferometry; holographic moiré; support; fiberglass.

Создание современных строительных конструкций базируется на изучении их деформированного состояния [1]. Результаты, полученные численно, не всегда могут быть признаны достоверными, если они не подтверждены экспериментально. Экспериментальные оптические методы можно разделить на две большие группы: методы, позволяющие изучать рельеф и изменение формы поверхности объектов [2, 3], и методы, позволяющие исследовать деформации в плоскости образца [4, 5]. При использовании голографической интерферометрии во встречных пучках в две экспозиции можно исследовать объекты, изготовленные из натуральных материалов с минимальной виброзащитой [6]. В первых работах предполагалось, что при восстановлении голограмм, записанных у металлизированного раstra, будут наблюдаться муаровые картины [7, 8] поэтому данную методику стали называть голографическим муаром [9, 10].

Получим уравнения, определяющие положение интерференционных полос, образующихся при восстановлении голограмм, записанных во встречных пучках в две экспозиции. Допустим, что перед участком поверхности изделия расположена фотопластинка с высокоразрешающей фотоэмульсией. Фотопластинка во время экспозиции освещается плоским когерентным светом (рис. 1). Световые волны, отраженные от разных точек поверхности раstra, интерферируют между собой и образуют интерференционную картину, которая при восстановлении определяет информацию, наблюдаемую в проходящем сквозь голограмму свете.

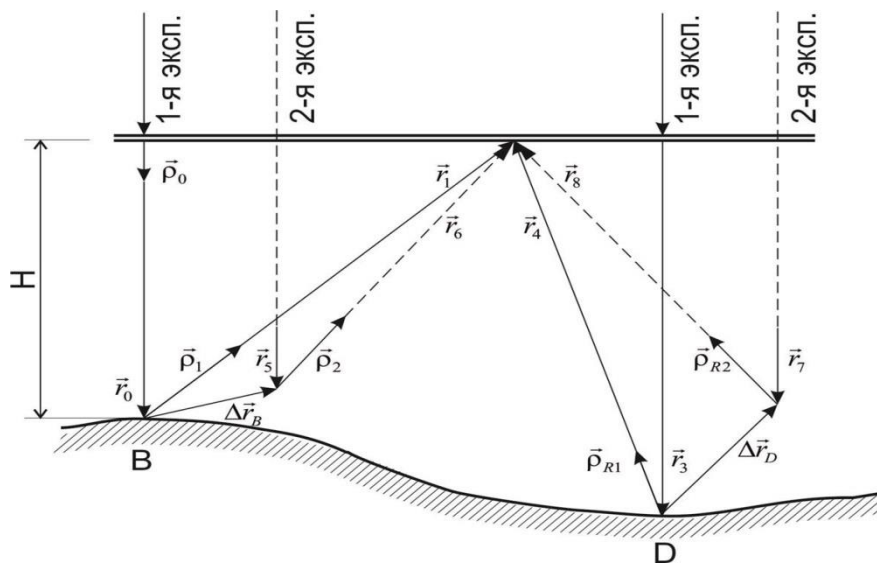


Рис. 1. Схема хода оптических лучей

Картины, регистрируемые в отраженном голограммой свете, определяются интерференцией световых волн, отраженных от поверхности изделия и освещающей волны. Найдем зависимость между картинами полос, наблюдаемых в проходящем и отраженном свете, с перемещениями точек поверхно-

сти изделия, полученными между экспозициями. Пусть в плоскости регистрирующей среды объектная и опорная волны описываются векторами \vec{A}_1 и \vec{A}_{R1} . Тогда фотопластинку будет освещать вектор \vec{A}_1 :

$$\vec{A}_1 = \vec{A}_1 + \vec{A}_{R1}. \quad (1)$$

Интенсивность света, равна квадрату модуля освещающего света

$$I_1 = \vec{A}_1 \cdot \vec{A}_1^* = \vec{A}_1^* \cdot \vec{A}_1 + \vec{A}_{R1}^* \cdot \vec{A}_1 + \vec{A}_1^* \cdot \vec{A}_{R1} + \vec{A}_{R1}^* \cdot \vec{A}_{R1}. \quad (2)$$

Здесь знаком * обозначены комплексно сопряженные векторы. Если время первого экспонирования t_1 , то на фотоэмульсию попадет энергия

$$E_1 = I_1 t_1. \quad (3)$$

Аналогично для второго экспонирования E_{II} получим выражения

$$\vec{A}_{II} = \vec{A}_2 + \vec{A}_{R2}; \quad I_{II} = \vec{A}_{II} \cdot \vec{A}_{II}^*; \quad E_{II} = I_{II} t_2, \quad (4)$$

где \vec{A}_{R2} и \vec{A}_2 – векторы опорной и объектной волны в плоскости регистрирующей среды во время второго экспонирования, а t_2 её длительность. Коэффициент амплитудного пропускания голограммы T считают пропорциональным полученной регистрирующей среде энергии:

$$T \approx E = I_1 t_1 + I_{II} t_2. \quad (5)$$

При восстановлении интерферограммы волной с вектором \vec{A}_{RC} возникают волновые фронты, световой вектор которых определяется выражением

$$\begin{aligned} \vec{A}_B = T \vec{A}_{RC} = & (\vec{A}_1^* \cdot \vec{A}_1 t_1 + \vec{A}_{R1}^* \cdot \vec{A}_{R1} t_1 + \vec{A}_2^* \cdot \vec{A}_2 t_2 + \vec{A}_{R2}^* \cdot \vec{A}_{R2} t_2) \vec{A}_{RC} = \\ & [(\vec{A}_1^* \cdot \vec{A}_1 t_1 + \vec{A}_2^* \cdot \vec{A}_2 t_2 + \vec{A}_{R1}^* \cdot \vec{A}_{R1} t_1 + \vec{A}_{R2}^* \cdot \vec{A}_{R2} t_2) + \\ & + (\vec{A}_{R1}^* \cdot \vec{A}_1 t_1 + \vec{A}_{R2}^* \cdot \vec{A}_2 t_2) + (\vec{A}_1^* \cdot \vec{A}_{R1} t_1 + \vec{A}_2^* \cdot \vec{A}_{R2} t_2)] \vec{A}_{RC}^*. \end{aligned} \quad (6)$$

Слагаемые в первых круглых скобках описывают свет, не дифрагировавший на голограмме. Слагаемые во вторых скобках описывают мнимое изображение, а в третьих скобках – действительное изображение. Удержим только слагаемое, которое описывает мнимое изображение

$$\vec{A}_{BM} = [\vec{A}_{R1}^* \cdot \vec{A}_1 t_1 + \vec{A}_{R2}^* \cdot \vec{A}_2 t_2] \vec{A}_{RC}, \quad (7)$$

интенсивность света в котором определится равенством

$$\begin{aligned} I = & \left\{ [\vec{A}_{R1}^* \cdot \vec{A}_1 t_1 + \vec{A}_{R2}^* \cdot \vec{A}_2 t_2] \vec{A}_{RC} \right\} \left\{ [\vec{A}_{R1}^* \cdot \vec{A}_1 t_1 + \vec{A}_{R2}^* \cdot \vec{A}_2 t_2] \vec{A}_{RC} \right\}^* = \\ = & [\vec{A}_{R1}^* \cdot \vec{A}_1 t_1 + \vec{A}_{R2}^* \cdot \vec{A}_2 t_2] [\vec{A}_{R1}^* \cdot \vec{A}_1 t_1 + \vec{A}_{R2}^* \cdot \vec{A}_2 t_2] I_{RC}, \end{aligned} \quad (8)$$

где I_{RC} – интенсивность восстанавливающей волны. Примем $t_1 = t_2 = t$, а также учтем, что величина I_{RC} влияет только на яркость восстановленной картины, поэтому при выводе разрешающих уравнений t и I_{RC} не будем учитывать. В комплексной форме векторы световых волн имеют вид

$$\begin{aligned}\vec{A}_1 &= A_1 e^{i(-\vec{K}_1 \cdot \vec{r}_1 + \varphi_1)}; & \vec{A}_{R1} &= \vec{A}_{R1} e^{i(-\vec{K}_{R1} \cdot \vec{r}_1 + \varphi_{R1})}; \\ \vec{A}_2 &= A_2 e^{i(-\vec{K}_2 \cdot \vec{r}_2 + \varphi_2)}; & \vec{A}_{R2} &= \vec{A}_{R2} e^{i(-\vec{K}_{R2} \cdot \vec{r}_2 + \varphi_{R2})},\end{aligned}\quad (9)$$

где A_1, A_{R1}, A_2, A_{R2} – амплитуды световых волн; $\varphi_1, \varphi_{R1}, \varphi_2, \varphi_{R2}$ – их начальные фазы; $\vec{K}_1, \vec{K}_{R1}, \vec{K}_2, \vec{K}_{R2}$ – соответствующие волновые векторы; \vec{r}_i – соответствующие радиусы-векторы.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}-\vec{K}_1 \cdot \vec{r}_1 + \vec{K}_{R1} \cdot \vec{r}_1 + \varphi_1 - \varphi_{R1} &= \alpha, \\ -\vec{K}_2 \cdot \vec{r}_2 + \vec{K}_{R2} \cdot \vec{r}_2 + \varphi_2 - \varphi_{R2} &= \beta.\end{aligned}\quad (10)$$

Считая $A_1 A_{R1} \approx A_2 A_{R2} = A^2$, найдем произведения, входящие в выражение (8):

$$\vec{A}_{R1} \cdot \vec{A}_1 = A^2 e^{i\alpha}; \quad \vec{A}_{R2} \cdot \vec{A}_2 = A^2 e^{i\beta}.\quad (11)$$

Тогда интенсивность света в мнимом изображении определяется выражением

$$I \approx (e^{i\alpha} + e^{i\beta})^* (e^{i\alpha} + e^{i\beta}) = 2 + 2\cos(\alpha - \beta).\quad (12)$$

Максимум интенсивности света достигается при условии

$$\alpha - \beta = 2\pi N.\quad (13)$$

Здесь N – порядковый номер полосы. С учетом принятых обозначений (10) и после умножения на $\frac{\lambda}{2\pi}$ зависимость (13) приводится к виду

$$-\vec{\rho}_1 \cdot \vec{r}_1 + \vec{\rho}_{R1} \cdot \vec{r}_1 + (\varphi_1 - \varphi_{R1}) \frac{\lambda}{2\pi} + \vec{\rho}_2 \cdot \vec{r}_2 - \vec{\rho}_{R2} \cdot \vec{r}_2 - (\varphi_2 - \varphi_{R2}) \frac{\lambda}{2\pi} = N\lambda.\quad (14)$$

Здесь $\vec{\rho}_i$ ($i=1, 2, R1, R2$) – единичные векторы, направления которых совпадают с направлениями распространения световых волн. Разности начальных фаз $\varphi_1 - \varphi_{R1}$ и $\varphi_2 - \varphi_{R2}$ в уравнении (14), являясь постоянными величинами, не влияют на шаг полос, а приводят только к сдвигу полос. Пренебрегая этими фазовыми задержками, уравнение (14) приведем к виду

$$(-\vec{\rho}_1 \cdot \vec{r}_1 + \vec{\rho}_{R1} \cdot \vec{r}_1) - (-\vec{\rho}_2 \cdot \vec{r}_2 + \vec{\rho}_{R2} \cdot \vec{r}_2) = N\lambda.\quad (15)$$

Первое слагаемое (в круглых скобках) – отвечает за разность хода световых лучей, полученную объектным и опорным пучком во время первой экспозиции, ее обозначим Δ_1 . Вторая скобка – это разность хода во второй экспозиции, ее обозначим Δ_2 . Тогда уравнение (15) примет следующий вид:

$$\Delta_1 - \Delta_2 = N\lambda.\quad (16)$$

На рис. 1 приведена схема интерферометра. Разность хода лучей надо рассчитывать от регистрирующей среды, которая освещается плоской волной с единичным вектором $\vec{\rho}_0$. Распространение световых волн во время первого экспонирования показано сплошными линиями, во время второго – пунктиром. Учтем, что

$$\begin{aligned} \vec{r}_5 &= \vec{r}_0 + \vec{W}_B; & \vec{r}_6 &= \vec{r}_1 - \Delta\vec{r}_B; & \vec{r}_7 &= \vec{r}_3 + \vec{W}_D; \\ \vec{r}_8 &= \vec{r}_4 - \Delta\vec{r}_D; & \vec{\rho}_2 &= \vec{\rho}_1 + \Delta\vec{\rho}_{12}; & \vec{\rho}_{R2} &= \vec{\rho}_1 + \Delta\vec{\rho}_R. \end{aligned} \quad (17)$$

Вычислим разности хода Δ_1 и Δ_2 :

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \vec{\rho}_0 \cdot \vec{r}_0 + \vec{\rho}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{r}_3 \cdot \vec{\rho}_0 - \vec{r}_4 \cdot \vec{\rho}_{R1}; \\ \Delta_2 &= \vec{r}_5 \cdot \vec{\rho}_0 + \vec{r}_6 \cdot \vec{\rho}_2 - \vec{r}_7 \cdot \vec{\rho}_0 - \vec{r}_8 \cdot \vec{\rho}_{R2} = (\vec{r}_0 + \vec{W}_B) \cdot \vec{\rho}_0 + \\ &+ (\vec{r}_1 - \Delta\vec{r}_B) \cdot (\vec{\rho}_1 + \Delta\vec{\rho}_{12}) - \vec{\rho}_0 \cdot (\vec{r}_3 + \vec{W}_D) - (\vec{\rho}_{R1} + \Delta\vec{\rho}_R) \cdot (\vec{r}_4 - \Delta\vec{r}_D). \end{aligned} \quad (18)$$

Подставив выражения (18) в уравнение (16), получим

$$\begin{aligned} &\vec{r}_0 \cdot \vec{\rho}_0 + \vec{\rho}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{r}_3 \cdot \vec{\rho}_0 - \vec{r}_4 \cdot \vec{\rho}_{R1} - \vec{r}_0 \cdot \vec{\rho}_0 + \vec{W}_B \cdot \vec{\rho}_0 - \vec{r}_1 \cdot \vec{\rho}_1 + \Delta\vec{r}_B \cdot \vec{\rho}_1 - \\ &- \Delta\vec{\rho}_{12} \cdot \vec{r}_6 + \vec{\rho}_0 \cdot \vec{r}_3 - \vec{W}_D \cdot \vec{\rho}_0 + \vec{\rho}_{R1} \cdot \vec{r}_4 - \vec{\rho}_{R1} \cdot \vec{r}_4 - \vec{\rho}_{R1} \cdot \Delta\vec{r}_D + \vec{\rho}_R \cdot \vec{r}_8 = \\ &= (\vec{W}_B \cdot \vec{\rho}_0 + \Delta\vec{r}_B \cdot \vec{\rho}_1) - (\vec{W}_D \cdot \vec{\rho}_0 + \Delta\vec{r}_D \cdot \vec{\rho}_{R1}) - (\Delta\vec{\rho}_{12} \cdot \vec{r}_6 - \Delta\vec{\rho}_R \cdot \vec{r}_8) = N\lambda. \end{aligned} \quad (19)$$

Векторы $\Delta\vec{\rho}_{12}$, \vec{r}_6 и $\Delta\vec{\rho}_R$, \vec{r}_8 практически ортогональны, поэтому их скалярные произведения равны нулю. Произведения $\vec{W}_B \cdot \vec{\rho}_0 = W_B$ и $\vec{W}_D \cdot \vec{\rho}_0 = W_D$, т. к. векторы \vec{W}_B , \vec{W}_D и $\vec{\rho}_0$ параллельны. Первая скобка $(\vec{W}_B \cdot \vec{\rho}_0 + \Delta\vec{r}_B \cdot \vec{\rho}_1)$ отвечает за разность хода, образовавшуюся за время между первой и второй экспозициями в объектных пучках, вторая – в опорных пучках. Так как опорный пучок не изменяется для картин, фиксируемых в отраженном свете, в этом случае вторая скобка равна нулю. Информация, регистрируемая в отраженном свете, может быть описана уравнением

$$(W_B + \Delta\vec{r}_B \cdot \vec{\rho}_1) = U_B \cos \alpha + V_B \cos \beta + W_B(1 + \cos \gamma) = N\lambda, \quad (20)$$

а для картин полос, наблюдаемых в проходящем свете, уравнением

$$\begin{aligned} &(\vec{W}_B + \Delta\vec{r}_B \cdot \vec{\rho}_1) - (\vec{W}_D + \Delta\vec{r}_D \cdot \vec{\rho}_{R1}) = \\ &= [U_B \cos \alpha + V_B \cos \beta + W_B(1 + \cos \gamma)] - \\ &- [U_D \cos \alpha_R + V_D \cos \beta_R + W_D(1 + \cos \gamma_R)] = N\lambda. \end{aligned} \quad (21)$$

С помощью уравнений (20) и (21) вычисляют компоненты вектора перемещения U , V и W . Величины углов α , β , γ задаются в ходе эксперимента выбором направления наблюдения. Углы α_R , β_R и γ_R определяются индикатрисой рассеивания поверхности изделия и её геометрической формой в области формирования опорного пучка; порядок полосы N определяется в ходе эксперимента.

При исследовании строительных элементов чаще всего изучаются плоские участки или участки, с малой кривизной, которой можно пренебречь. Тогда $\alpha_R = 90^\circ$, $\beta_R = 90^\circ$, $\gamma_R = 0$, и уравнение (21) упрощается:

$$U_B \cos \alpha + V_B \cos \beta + W_B(1 - \cos \gamma) - 2W_D = N\lambda. \quad (22)$$

При восстановлении голограмм, записанных у поверхности металлизированного раstra, углы α , β и γ постоянны по всей изучаемой поверхности и изменяются дискретно. Если изучаемая поверхность диффузно рассеивающая, они определяются свойствами индикатрисы рассеивания поверхности.

Для определения компонент вектора перемещения в отдельности по картинам, в отраженном свете, регистрируют полосы, наблюдаемые с направлений, симметричных относительно нормали к голограмме. Если направления расположены в плоскости yoz , то разрешающие уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} V_B \sin \gamma + W_B (1 + \cos \gamma) &= N_1 \lambda, \\ -V_B \sin \gamma + W_B (1 + \cos \gamma) &= N_2 \lambda. \end{aligned} \quad (23)$$

Здесь N_1 и N_2 – порядки полос на интерференционных картинах, наблюдаемых с симметричных относительно нормали направлений. Величина компоненты перемещения, параллельной плоскости регистрации, определяется соотношением

$$V_B = \frac{(N_1 - N_2) \lambda}{2 \sin \gamma}. \quad (24)$$

Определение перемещений по картинам полос на просвет возможно только при отсутствии зазора между исследуемой поверхностью и голограммой или малых углах наблюдения. В последнем случае положение полос в фиксируемой плоскости yoz определяется уравнением

$$V_B \sin \gamma + W_B (1 - \cos \gamma) = N \lambda. \quad (25)$$

При записи голограммы у поверхности раstra $\sin \alpha = n \lambda \psi$; λ – длина волны; n – дифракционный порядок; ψ – частота рабочего раstra; V_B – перемещение, нормальное к линиям рабочего раstra и лежащее в его плоскости. В этом случае для определения перемещения в плоскости можно использовать формулу (24).

Описанный способ был применен для изучения деформированного состояния опоры из стеклопластика АГ-4 (рис. 2, 3). Оба балансира шарнира изготовлены полыми со стенками толщиной 15 мм и размерами балансира 75×220 мм. При проектировании опорных шарниров из стеклопластика возникает вопрос о назначении их основных размеров. Поиск зависимости несущей способности шарнира от геометрических размеров и формы эмпирическим путем связан с выполнением многочисленных экспериментов комбинаторного типа. Привлечение численных методов позволяет решать эту задачу на основе использования поисковых методов оптимального проектирования. Необходимым условием для получения достоверных результатов оптимального проектирования является соответствие расчетной модели реальной работе конструкции. На лицевой поверхности опоры была нанесена металлизированная ортогональная решетка частотой 912 мм^{-1} . На рис. 2 изображены картины полос, сфотографированные в вертикальной (А, Б) и горизонтальной (В, Г) плоскостях. При записи голограммы первое экспонирование производилось при сжимающей нормальной к опоре нагрузке 40 кН, второе – при 60 кН.

Результаты обработки интерферограмм приведены на рис. 3. При вычислении деформаций предполагалось линейное распределение перемещений на поверхности опоры на участке между интерференционными полосами.

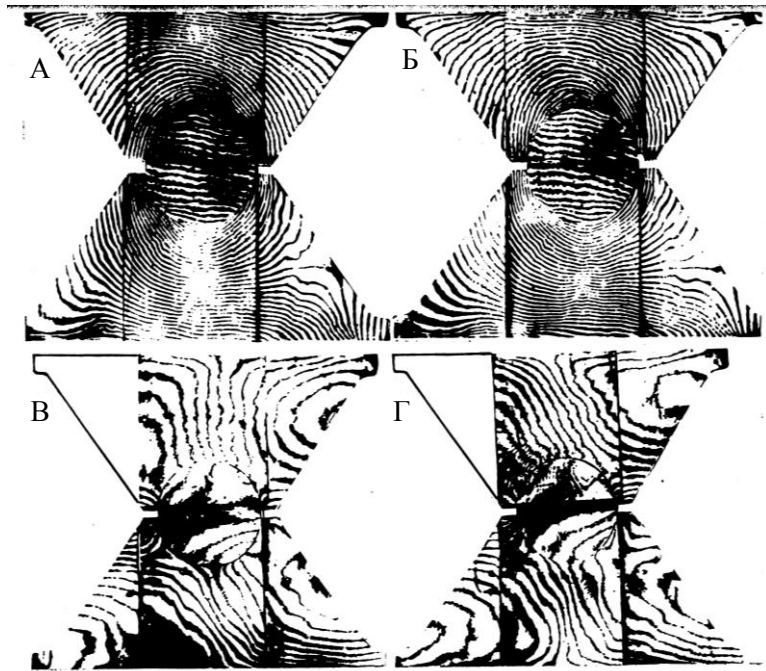


Рис. 2. Картины полос, зарегистрированных в проходящем свете

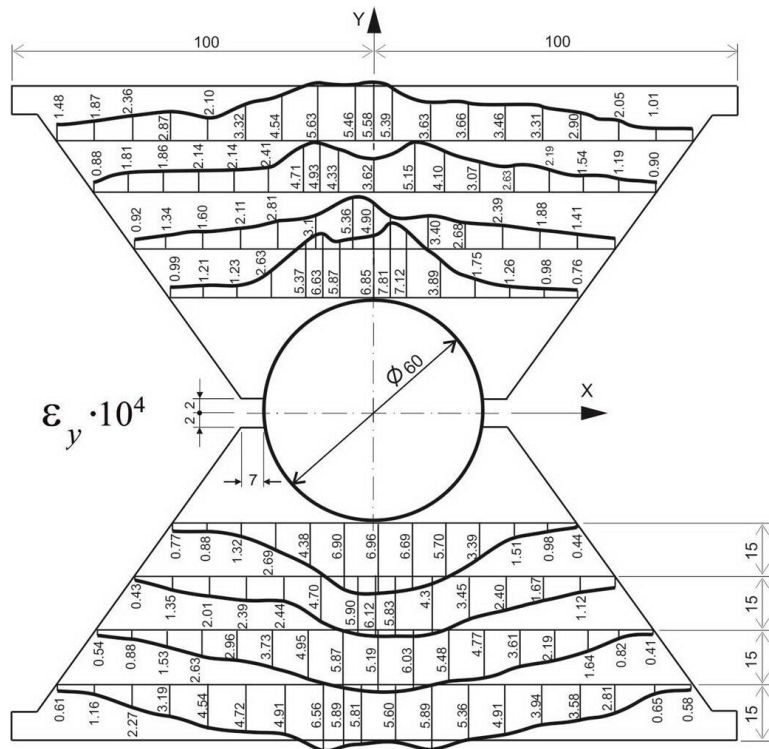


Рис. 3. Поле деформаций в плоскости опоры

Сравнение результатов численного расчета и экспериментальных результатов показало, что картина изолиний вертикальных перемещений качественно хорошо совпадает с картиной муаровых полос (см. рис. 2, А, Б), однако вычисленные максимальные значения перемещения в направлении действия силы были на 45 % выше данных, полученных экспериментально. Наиболее ярко отличие численных данных и результатов эксперимента проявляется при сравнении полей перемещений, параллельных нижней поверхности балансира, представленных на рис. 2, В и Г и рис. 4.

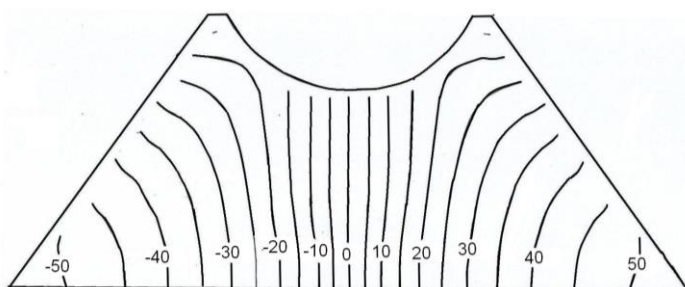


Рис. 4. Изолинии горизонтальных перемещений до коррекции расчетной схемы ($10 = 3,66$ мкм)

В этом случае максимальные перемещения более чем в три раза превышают реальные, и картины изолиний и муаровых полос существенно отличаются. Это расхождение можно объяснить наличием трения между опорой и пластиной, на которую опиралась опора. Трение было смоделировано введением шарнирно-стержневых элементов между нижними узлами в расчетной схеме. Результаты расчета с использованием скорректированной расчетной схемы представлены на рис. 5.

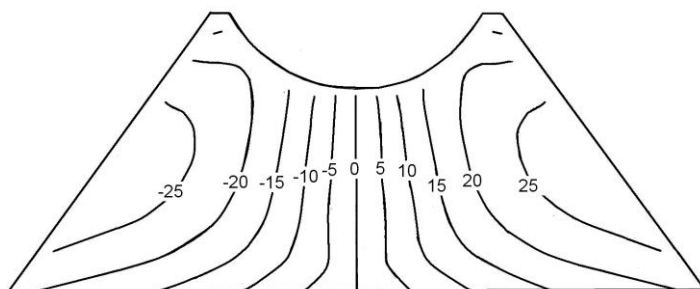


Рис. 5. Изолинии горизонтальных перемещений после коррекции расчетной схемы ($10 = 2,22$ мкм)

Внешний вид изолиний поля перемещения стал ближе к экспериментальным результатам (картины интерференционных полос). В итоге максимальное расхождение результатов снизилось до 13 % по вертикальным и до 11 % по горизонтальным перемещениям. Скорректированная расчетная схема была использована при оптимальном проектировании опорной части.

Таким образом, данное исследование иллюстрирует эффективность применения метода голографического муара с использованием высокочастотных (порядка 1000 линий/мм) растров для исследования опорной части из стеклопластика. Проведенное исследование позволило не только установить значительные различия экспериментальных данных и данных, полученных при конечно-элементном расчете, но и установить причину этих различий. Это позволило скорректировать расчетную конечно-элементную схему.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Численное моделирование акустической эмиссии при исследовании элементов мостовых конструкций / Т.В. Сыч, С.П. Васильев, С.А. Бехер, С.И. Герасимов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 2. – С. 212–221.
2. Popov, A.M. Optimization of fringe pattern scheme registration in moiré topography / A.M. Popov, V.B. Zinov'ev, A.V. Kolesnikov // Progress in Biomedical Optics and Imaging. – 1996. – Т. 2791. – С. 150–155.
3. Попов, А.М. Высокочастотный метод теневого муара / А.М. Попов, В.Б. Зиновьев, Н.Л. Прохорова // Научные труды SWorld. – 2008. – Т. 4. – № 4. – С. 25–28.
4. Зиновьев, В.Б. О расстановке нагелей крестообразного сечения в соединении деревянных элементов / В.Б. Зиновьев, В.Н. Шведов, А.М. Попов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 3. – С. 127–131.
5. Попов, А.М. Деформированное состояние мостовых конструкций вблизи нагеля круглого сечения / А.М. Попов, В.Б. Зиновьев, Л.А. Сподарева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 77–80.
6. Попов, А.М. Использование нагелей крестообразного сечения для соединений элементов мостовых конструкций / А.М. Попов, В.Б. Зиновьев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 2. – С. 235–238.
7. Жилкин, В.А. Возможные методы расшифровки голографических интерферограмм, записанных у поверхности металлизированных растров / В.А. Жилкин, В.Б. Зиновьев // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений. – Новосибирск, 1980. – С. 113–120.
8. Gerasimov, S.I. Superposed holographic interferometers – recent developments / S.I. Gerasimov, V.A. Zhilkin, V.B. Zinoviev // Lasers and their application IV National conference and technical exhibition with international participation: abstracts, 1990. – С. 104–105.
9. Попов, А.М. Метод голографического муара во встречных пучках / А.М. Попов, В.Б. Зиновьев // Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки : материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Научно-издательский центр «Академический», 2016. – С. 70–73.
10. Попов, А.М. Развитие оптико-геометрических методов механики деформируемого твердого тела / А.М. Попов, В.Б. Зиновьев // Научные труды SWorld. – 2007. – Т. 2. – № 4. – С. 36–44.

REFERENCES

1. Sych T.V., Vasil'ev S.P., Bekher S.A., Gerasimov S.I. Chislennoe modelirovanie akusticheskoi emissii pri issledovanii elementov mostovykh konstruktzii [Numerical modeling of acoustic emission in bridge structures]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 2. Pp. 212–221. (rus)
2. Popov A.M., Zinov'ev V.B., Kolesnikov A.V. Optimization of fringe pattern scheme registration in moiré topography. *Progress in Biomedical Optics and Imaging*. 1996. V. 2791. Pp. 150–155.
3. Popov A.M., Zinov'ev V.B., Prokhorova N.L. Vysokochastotnyi metod tenevogo muara [High-frequency method of shadow moiré]. *Nauchnye trudy SWorld*. 2008. V. 4. No. 4. Pp. 25–28. (rus)

4. Zinov'ev V.B., Shvedov V.N., Popov A.M. O rasstanovke nagelei krestoobraznogo secheniya v soedinenii derevyannykh elementov [Arrangement of cruciform cross nails in wooden element joints]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2012. No. 3. Pp. 127–131. (rus)
5. Popov A.M., Zinov'ev V.B., Spodareva L.A. Deformirovannoe sostoyanie mostovykh konstruktssii vblizi nagelya kruglogo secheniya [Deformed state of bridge structures near gun nail of circular cross-section]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2015. No. 3. Pp. 77–80. (rus)
6. Popov, A.M., Zinov'ev V.B. Ispol'zovanie nagelei krestoobraznogo secheniya dlya soedinenii elementov mostovykh konstruktssii [Cruciform gun nail for connecting bridge elements]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 2. Pp. 235–238. (rus)
7. Zhilkin V.A., Zinov'ev V.B. Vozmozhnye metody rasshifrovki golograficheskikh interferogramm, zapisannykh u poverkhnosti metallizirovannykh rastrov [Method of holographic moiré in colliding beams]. *Mekhanika deformiruemogo tela i raschet transportnykh sooruzhenii*. Novosibirsk, 1980. Pp. 113–120. (rus)
8. Gerasimov S.I., Zhilkin V.A., Zinoviev V.B. Superposed holographic interferometers – recent developments. *Proc. Nat. 4th Conf. 'Lasers and Their Application'*, 1990. Pp. 104–105.
9. Popov A.M., Zinov'ev V.B. Metod golograficheskogo muara vo vstrechnykh puchkakh [Holographic moiré in colliding beams]. *Proc. 8th Int. Sci. Conf. 'Fundamental Science and Technology – Promising Developments XIII'*, 2016. Pp. 70–73. (rus)
10. Popov A.M., Zinov'ev V.B. Razvitie optiko-geometricheskikh metodov mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela [Development of optical geometric methods of solids mechanics]. *Nauchnye trudy SWorld*. 2007. V. 2. No. 4. Pp. 36–44. (rus)