

Ю.В.ВЕРЕТЕЛЬНИК, НТУ «ХПИ»

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТИТАНОВЫХ ЭНДОПРОТЕЗОВ

Запропоновано підхід до розрахунково-експериментального дослідження елементів біомеханічних систем. Досліджено напружено-деформований стан титанового ендопротеза. Отримані експериментально обґрунтовані скінчено-елементні моделі досліджуваних ендопротезів.

The experiment-calculated approach for research of the biomechanics systems elements is offered. The stressedly-deformed state of titanium implants is investigated. The experimentally grounded finite elements models of the implants are got.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящее время в жизни человека в числе других можно выделить два негативных аспекта. Во-первых, малоактивный образ жизни (имеется в виду отсутствие регулярной физической нагрузки для поддержания мышечной системы в надлежащей форме). С другой стороны, человек в повседневной жизни постоянно подвергается критическим для позвоночного столба нагрузкам, а именно неправильное поднятие и переноска тяжелых грузов, сильные динамические перегрузки в транспорте и т.д. Кроме перечисленных факторов, с возрастом проявляются различные патологии.

В результате количество травм позвоночного столба постоянно растет. Достаточно большое количество повреждений удается вылечить, не прибегая к хирургическому вмешательству. Но все равно количество случаев, требующих операций, постоянно растет [1-5]. При операциях используются эндопротезы различных конструкций отдельно или в сочетании с разнообразными поддерживающими конструкциями. Это обуславливает актуальность исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) эндопротезов различных конструкций.

Исследованию данной проблемы уделяется много внимания. Существует достаточно много вариантов конструкций эндопротезов. Данная статья посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния одного из вариантов эндопротеза, разработанного в Харькове.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. При проведении экспериментальных исследований могут ставиться различные цели. В данном конкретном случае исследования проводятся с целью верификации математической численной моделей для описания НДС эндопротезов.

Стремительное развитие технологий проектирования предоставило конструкторам мощные средства проектирования. Конструктор может не только спроектировать конструкцию, но провести экспресс-анализ конструктивных решений. Выбранный вариант инженер-расчетчик может обосновать с помощью специальных программных продуктов. При этом расчеты могут быть

практически любой сложности: от простой статической задачи до моделирования нелинейных быстропротекающих динамических процессов. Правильно спланированная и проведенная серия расчетов позволяет почти полностью отказаться от дорогостоящего физического моделирования. Совсем отказаться от экспериментов не позволяет важный вопрос обеспечения достоверности численной модели.

Предлагается следующая концептуальная схема. Строится математическая модель, и на ее основе проводится численное моделирование НДС. Затем отдельно строится физическая модель, и проводится эксперимент. Результаты численного и физического моделирования сравниваются. На основе этого сравнения в математическую модель вносятся коррективы. После коррекции математической модели можно провести следующую итерацию. Процесс можно повторять необходимое количество раз, пока модель с необходимой точностью можно считать достоверной.

Возвращаясь к теме статьи, необходимо провести исследование напряженно-деформированного состояния эндопротеза. Для проведения численного моделирования использовался метод конечных элементов. Экспериментальные исследования проводятся методом голографической интерферометрии.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

3.1. Основные соотношения голографической интерферометрии. Голографическая интерферометрия [6-12] является мощным инструментом проведения экспериментальных исследований. Она позволяет измерить перемещения точек поверхности исследуемого объекта. Отличительной особенностью является возможность получения результатов измерений бесконтактным способом. Это достигается за счет того, что поверхность тела освещается электромагнитным излучением. Поскольку нас не интересует физическая природа волны, то при ее описании мы ограничимся только вектором напряженности электрического поля \mathbf{E} . Второй причиной, по которой мы опускаем остальные характеристики электромагнитного поля, являются особенности используемых для регистрации фотоматериалов, которые реагируют только на электрическое поле.

В основном для измерений методом голографической интерферометрии в качестве источника света используется лазер. Лазеры излучают практически монохроматические световые волны с плоскими волновыми фронтами. Излучение обычного He-Ne-лазера непрерывного действия, используемого в голографической интерферометрии, имеет длину волны $\lambda = 632,8$ нм. Оно испускается в виде узкого пучка диаметром около 2 мм с угловой расходимостью, не превышающей 0,7 мрад [6]. Наиболее важной характеристикой лазерного излучения с точки зрения применения в методе голографической спекл-интерферометрии является его высокая когерентность.

Явление интерференции занимает центральное место в методе спекл-голографической интерферометрии [6]. На регистрирующей среде фиксиру-

ется картина освещенности, которая представляет собой усредненный во времени световой поток. Освещенность I^0 определяется по формуле [6]:

$$I^0 = \varepsilon v (\mathbf{E}^2), \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, в которой распространяется свет, а v – скорость его распространения.

Освещенность I^0 пропорциональна усредненному во времени квадрату электрического вектора \mathbf{E}^2 . Рассмотрим явление интерференции. Пусть имеются две различные световые волны \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 одинаковой частоты, которые налагаются друг на друга. Поскольку $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$, освещенность определяется выражением

$$I^1 = \overline{\mathbf{E}^2} = \overline{\mathbf{E}_1^2} + \overline{\mathbf{E}_2^2} + 2\overline{\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2}, \quad (2)$$

где $I^1 = I^0 / \omega$ – величина, пропорциональная I^0 ;

$\overline{\quad}$ – величина, усредненная по времени.

Пусть \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 – две линейно-поляризованные в одном направлении волны:

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}), \quad E_2 = A_2 \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \phi), \quad (3)$$

где ϕ – постоянный относительный фазовый сдвиг между двумя волнами. При комбинировании выражения (3) и усреднении во времени

$$\overline{I^1} = \overline{I_1^1} + \overline{I_2^1} + 2\sqrt{\overline{I_1^1} \cdot \overline{I_2^1}} \cos \delta, \quad (4)$$

где $\overline{I_1^1} = A_1^2$, $\overline{I_2^1} = A_2^2$, $\delta = (\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r})$ – разность фаз между двумя волнами в произвольной точке. Освещенность меняется от минимального значения

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \delta$$

в точках, где $\delta = (2N + 1)\pi$, до максимального

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \delta,$$

где $\delta = 2N\pi$ (здесь N – целое положительное число). Распределение освещенности в произвольной плоскости можно зарегистрировать, поместив в эту плоскость фотопластинку. Мы имеем картину, состоящую из чередующихся светлых и темных полос. Эта интерференционная картина позволяет опреде-

лить пространственное распределение разности фаз между рассматриваемыми волнами.

Голография представляет собой метод записи и восстановления световых волн. Волна, которую записывают, называется предметной волной. Однако фотопленка или любой другой детектор регистрирует только освещенность. Освещенность, создаваемая предметной волной, есть $I_0 = \mathbf{U}_0 \cdot \mathbf{U}_0^*$ (\mathbf{U}_0 – комплексная амплитуда предметной волны в какой-нибудь одной плоскости в пространстве), т. е. действительная величина. Следовательно, на пленке, на которую падает эта волна, будет зарегистрировано распределение действительных амплитуд, а информация о распределении фаз оказывается потерянной. В явлении интерференции распределение фаз преобразуется в распределение освещенности в интерференционной картине, которое может быть зарегистрировано на фотослое.

Обычно в голографической интерферометрии используют внеосевые голограммы, записываемые по методу Лейта и Упатниекса. Их схема позволяет пространственно разделить три волны, возникающие при дифракции в процессе восстановления. Она основана на общеизвестном в теории связи способе кодирования и декодирования сигналов с помощью их модуляции высокочастотной несущей волной. В голографии, правда, имеют дело с пространственными частотами, однако принцип остается тем же. Опорная волна, добавляемая к опорной когерентная с ней и используемая для записи внеосевой голограммы, распространяется под некоторым углом к предметной волне. Для восстановления предметной волны голограмму освещают плоской волной, распространяющейся в том же самом направлении, что и исходная опорная волна.

На рис. 1, а представлена типичная оптическая система для записи внеосевых голограмм [6]. Используя метод внеосевой голографии, можно получать трехмерные изображения диффузно отражающих объектов, которые кажутся покрытыми интерференционными полосами. Присутствие интерференционных полос на изображении объекта говорит о том, что объект испытал деформацию, смещение или вращение. Интерферометрия такого типа возможна благодаря тому, что голографический метод позволяет зарегистрировать волну, рассеянную объектом, а затем восстановить ее с точностью, допускающей ее интерферометрическое сравнение с волной, рассеянной тем же объектом, но в другое время. Возможен и иной способ - интерферометрическое сравнение восстановленной волны с другой голографически зарегистрированной и восстановленной волной, рассеянной тем же объектом.

Результат сложения двух или более таких волн – голографическая интерферограмма. Термин “интерферограмма” – эта картина интерференционных полос, зарегистрированной на фотослое, а также образованной на двумерном экране или сетчатке глаза.

Голография – линейный процесс в том смысле, что она позволяет зарегистрировать последовательно во времени две или более оптических волны,

которые впоследствии могут быть восстановлены одновременно. Поэтому с ее помощью можно производить суммирование, вычитание или даже усреднение во времени совокупности волн.

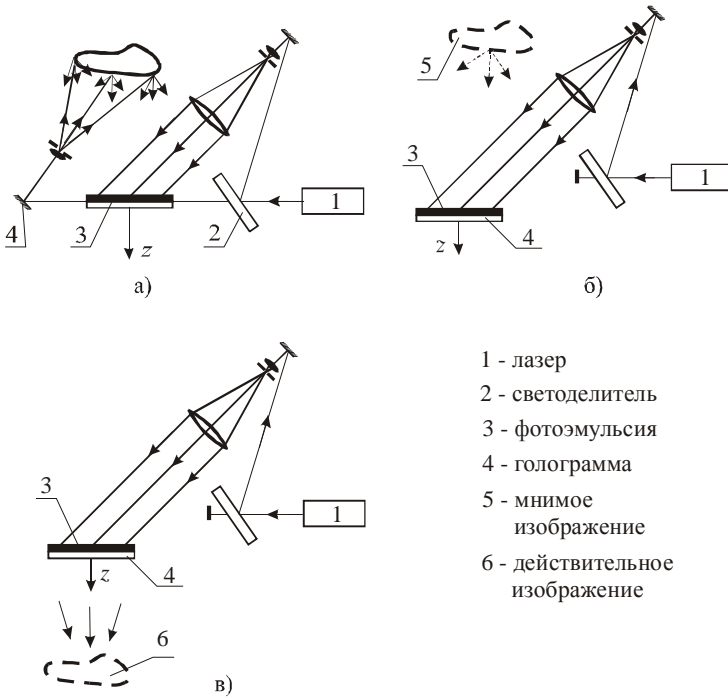


Рис. 1. Внеосевая голография:

- а – оптическая система для записи голограмм;
- б – восстановление прямого мнимого изображения;
- в – восстановление сопряженного действительного изображения

Освещенность, создаваемая восстановленной волной [6]:

$$I^1(x, y) = 2a^2(x, y) \{1 + \cos[\Delta\phi(x, y)]\}. \quad (5)$$

Выражение (5) дает освещенность объекта $a^2(x, y)$, промодулированную интерференционными полосами $2\{1 + \cos[\Delta\phi(x, y)]\}$. Темные полосы – это линии, вдоль которых значения фазы $\Delta\phi$ являются нечетными кратными числа π , светлые полосы – линии постоянных значений фазы $\Delta\phi$, являющихся четными кратными числа π .

Голографическая интерферометрия во многих случаях является эффек-

тивным и единственно возможным методом исследования. В основе этого лежат следующие ключевые свойства: высокая информативность, разделение амплитуды во времени, непрерывная запись событий, временная фильтрация.

Принимается следующая модель. Поверхность объекта состоит из набора точечных рассеивателей. Если произвольная точка поверхности P претерпевает смещение \mathbf{L} в новое положение P' , то голографическая интерференционная картина образуется в результате интерференции света, рассеянного точками P и P' , тогда как интерференции света, рассеянного точкой P , со светом, рассеянным всеми другими точками поверхности, не происходит. Эта модель удобна и достаточна для целей интерпретации полос. Роль голограммы состоит в том, чтобы воспроизвести свет, рассеянный объектом как в исходном, так и в смещенном положении. На рис. 2 приведены основные элементы схемы расшифровки, причем основной задачей является увязывание сдвига фаз δ и перемещения точек \mathbf{L} . Исходя из соотношений на рис. 2, можно записать:

$$\phi_1 = \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \mathbf{k}_2(\mathbf{R} - \mathbf{r}_1) + \phi_r; \quad (6)$$

$$\phi_2 = \mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r}_3 + \mathbf{k}_4(\mathbf{R} - \mathbf{r}_3) + \phi_r, \quad (7)$$

где ϕ_1 и ϕ_2 – фазы световой волны, рассеянной точкой P до и после смещения;

ϕ_r – произвольная фаза, приписываемая этим волнам в точке O , в которой расположен источник. Разность фаз, измеряемая наблюдателем, равна

$$\delta = \phi_2 - \phi_1. \quad (8)$$

Тогда

$$\delta = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1)(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1) + \Delta\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_3 + \Delta\mathbf{k}_2(\mathbf{R} - \mathbf{r}_3). \quad (9)$$

В реальной системе величины \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_3 гораздо больше, чем $\mathbf{L} = \mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1$, так что для практических целей можно считать, что $\Delta\mathbf{k}_1 \perp \mathbf{r}_3$ и $\Delta\mathbf{k}_2 \perp (\mathbf{R} - \mathbf{r}_3)$.

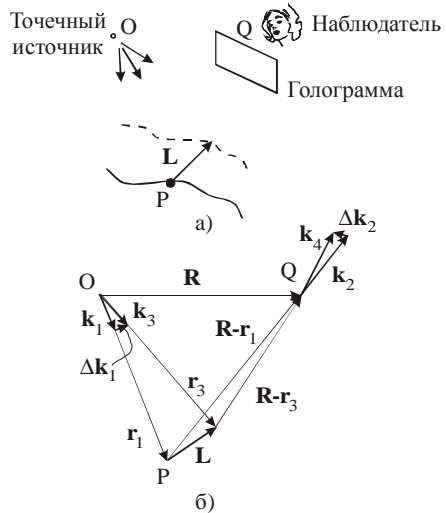


Рис. 2. Обозначения, используемые при анализе интерференционных полос: а – схема установки; б – векторы положения точек и волновые векторы

Поэтому два последних скалярных произведения в равенстве (9) пренебрежимо малы, и приходим к соотношению

$$\delta = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}. \quad (10)$$

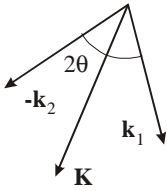


Рис.3. Вектор чувствительности

Это простое соотношение является основой количественной интерпретации полос в голографической интерферометрии. Удобно ввести вектор чувствительности $\mathbf{K} \equiv (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1)$, так что

$$\delta = \mathbf{K} \cdot \mathbf{L}.$$

Пусть 2θ – угол между направлениями освещения и наблюдения, как показано на рис. 3. Вектор чувствительности имеет величину $2k \cos \theta$ и совпадает с биссектрисой угла между направлениями освещения и наблюдения. Таким образом, одно наблюдение интерферограммы дает величину δ , которая позволяет определить компоненту \mathbf{L} в этом направлении.

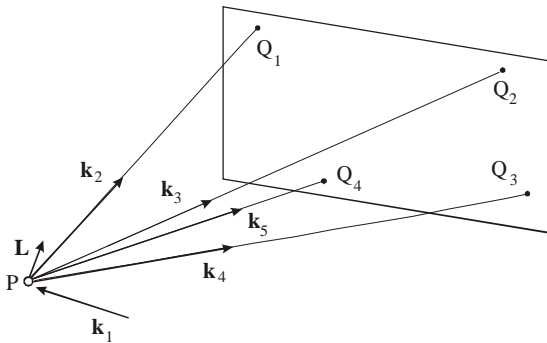


Рис.4. Одноголограммный метод (наблюдение ведется из четырех положений на одной голограмме)

Для определения компонент вектора \mathbf{L} необходимо провести серию измерений. Рассмотрим одноголографический метод измерения вектора смещения. Проанализируем схему, изображенную на рис. 4. Три независимых измерения фазы можно сделать, наблюдая точку объекта P через три различные точки голограммы Q_1, Q_2, Q_3 . Если наблюдатель непрерывно перемещает глаз из точки Q_1 в точку Q_2 , фиксируя свой взгляд (через небольшую диафрагму или телескоп) на точке P , то ему будет казаться, что полосы пересекают поле зрения. Число полос N_{1-2} , прошедших через поле зрения, является мерой разности $\delta_1 - \delta_2$, а именно:

$$\delta_1 - \delta_2 = 2\pi N_{1-2}.$$

Имея это в виду, уравнение вида (10) можно записать для каждого из четырех направлений наблюдения, показанных на рис. 4,

$$\begin{aligned} \delta_1 &= (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}; \\ \delta_2 &= (\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}; \\ \delta_3 &= (\mathbf{k}_4 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}; \\ \delta_4 &= (\mathbf{k}_5 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}. \end{aligned} \quad (11)$$

Попарно вычитая эти уравнения можно получить

$$\begin{aligned} \delta_1 - \delta_2 &= (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3) \cdot \mathbf{L} = \overline{\mathbf{K}}_1 \cdot \mathbf{L}; \\ \delta_2 - \delta_3 &= (\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4) \cdot \mathbf{L} = \overline{\mathbf{K}}_2 \cdot \mathbf{L}; \\ \delta_3 - \delta_4 &= (\mathbf{k}_4 - \mathbf{k}_5) \cdot \mathbf{L} = \overline{\mathbf{K}}_3 \cdot \mathbf{L}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{bmatrix} \overline{K}_{1x} & \overline{K}_{1y} & \overline{K}_{1z} \\ \overline{K}_{2x} & \overline{K}_{2y} & \overline{K}_{2z} \\ \overline{K}_{3x} & \overline{K}_{3y} & \overline{K}_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = 2\pi \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Хотя приведенная ранее теория измерения вектора смещения достаточно ясна, при ее экспериментальном применении может возникнуть ряд проблем, влияющих на точность измерений. Наиболее очевидный источник ошибок связан с вектором чувствительности. Если общая ориентация смещений известна априори, то можно таким образом расположить голографическую систему, чтобы вектор чувствительности был почти параллелен \mathbf{L} , что позволяет производить точные измерения величины \mathbf{L} . Если направление вектора \mathbf{L} неизвестно, следует использовать более общие схемы, приводящие к уравнениям (12). Обычно телесный угол, охватываемый голограммой, невелик, и, следовательно, $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3$ почти параллельны. В результате система уравнений (12) оказывается плохо обусловленной, и малые ошибки в измерении N_{1-2} , N_{2-3} и N_{3-4} усиливаются и приводят к большим ошибкам в величинах L_x, L_y, L_z . Решение будет также чувствительным к точности геометрических измерений при определении матричных коэффициентов. Для количественного решения этих вопросов справедливы соотношения:

$$\overline{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{L} = 2\pi N, \quad (13)$$

$$\text{где } \bar{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \bar{K}_{1x} & \bar{K}_{1y} & \bar{K}_{1z} \\ \bar{K}_{2x} & \bar{K}_{2y} & \bar{K}_{2z} \\ \bar{K}_{3x} & \bar{K}_{3y} & \bar{K}_{3z} \end{bmatrix}; \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix}; \mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_{1-2} \\ N_{2-3} \\ N_{2-4} \end{bmatrix}.$$

Для относительной ошибки можно записать

$$\frac{\|\Delta \mathbf{L}\|}{\|\mathbf{L}\|} \leq \text{cond}(\bar{\mathbf{K}}) \frac{\|\Delta \mathbf{N}\|}{\|\mathbf{N}\|}; \quad (14)$$

$$\frac{\|\Delta \mathbf{L}\|}{\|\mathbf{L}\|} \leq \text{cond}(\mathbf{K}) \frac{\|\Delta \bar{\mathbf{K}}\|}{\|\bar{\mathbf{K}}\|}, \quad (15)$$

где $\text{cond}(\mathbf{K})$ – обусловленность матрицы \mathbf{K} ;

$\|\Delta \mathbf{N}\|$, $\|\Delta \bar{\mathbf{K}}\|$ – соответственно ошибка в определении номеров полос и ошибка определения коэффициентов матрицы \mathbf{K} , обусловленная неточностью геометрических измерений.

Для повышения точности измерений удобно использовать методику, соединяющую в одной измерительной схеме запись голограммы во встречных пучках по схеме Денисюка и фиксацию спекл-фотографии [13-20]. Для определения компонент перемещений, перпендикулярных плоскости голограммы, используется соотношение

$$u_n = (\lambda N) / 2, \quad (16)$$

где N – номер полосы;

u_n – нормальная составляющая вектора перемещения \mathbf{u} ;

λ – длина волны лазера.

Для определения перемещений u_τ в плоскости спекл-фотографии используются соотношения (рис. 5)

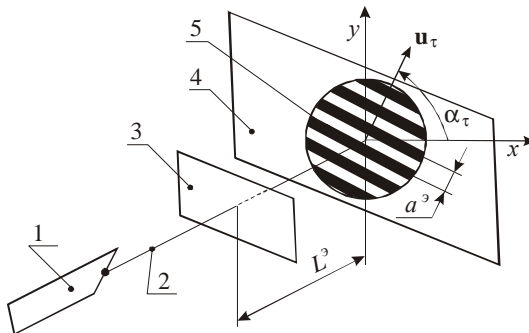


Рис. 5. Схема поточечной расшифровки спекл-интерферограмм:
 1 – лазер; 2 – неразведенный луч; 3 – спекл-интерферограмма; 4 – экран;
 5 – картина полос

$$u_{\tau} = \frac{\lambda a^3}{L^3},$$

где a^3 – расстояние между полосами на экране;

L^3 – расстояние до экрана.

При этом вектор u_{τ} направлен по перпендикуляру к полосам, наблюдаемым на экране при освещении спекл-интерферограммы неразведенным лучом лазера (см. рис.5).

Рассмотрим природу погрешностей метода голографической и спекл-интерферометрии. Природа и источники погрешностей: погрешность самой модели; погрешность измерительной схемы; погрешность носителя; погрешность расшифровки.

Влияние погрешности модели является неуправляемой величиной в ходе эксперимента. Она минимизируется при соблюдении технологии изготовления объекта или его физической модели, а также путем статистической обработки результатов множества измерений на некоторой выборке исследуемых объектов. Что касается остальных компонент погрешности, то они минимизируются путем разработки новых измерительных схем, методов расшифровки и обработки информации.

Погрешность измерительной схемы в данном случае сводится к минимуму путем использования схемы, соединяющей запись метода голографической интерферограммы и спекл-фотографии на одном носителе одновременно [13]. В этом случае удается избежать погрешностей, обусловленных традиционными технологиями расшифровки ((13)-(15)). Соотношение (16), в котором нормальная составляющая вектора перемещений отделена от тангенциальной, позволяет исключить взаимовлияние этих компонент, что максимально увеличивает точность измерений. В этом случае погрешности измерений определяются по соотношению

$$\frac{\|\Delta u_N\|}{\|u_N\|} = \frac{\|\Delta N\|}{\|N\|}. \quad (17)$$

Соответственно в данном случае относительная погрешность гораздо меньше, поскольку отсутствует влияние $cond(\mathbf{K})$.

Погрешность носителя (регистрирующей среды) уменьшается применением высококачественных фотопластин ПФГ-03, позволяющих регистрировать с высокой разрешающей способностью интерференционные полосы, что для практических приложений обеспечивает и точность фиксации, и допустимую густоту полос на голограмме. Вклад указанных выше составляющих погрешности измерений можно уменьшить практически до долей

процента.

3.2. Экспериментальная установка для записи и расшифровки интерферограмм исследуемого эндопротеза. На рис.6 изображена схема экспериментальной установки. На основании смонтировано нагружающее устройство, которое с заданной нагрузкой воздействует сжимающим усилием на объект. Состояние объекта регистрируется на фотопластине, освещаемой лазером через оптическую систему. Используется He-Ne-лазер непрерывного действия с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. В качестве регистрирующей среды используются высококачественные фотопластины ПФГ-03.

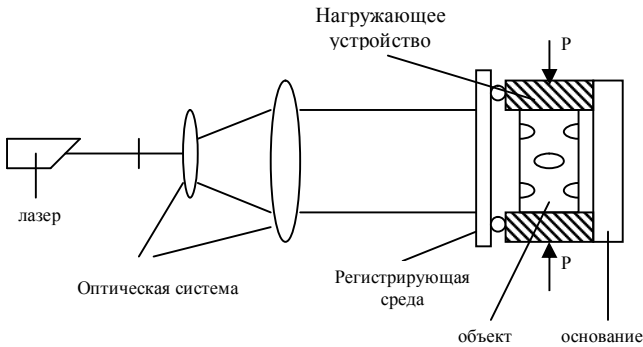


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

3.3. Результаты экспериментальных исследований. На рис. 7–8 приведены фотографии интерферограмм исследуемого объекта. Хорошо видно нагружающее устройство. Черные полосы на интерферограммах, так называемые линии уровня, – это линии равных перемещений точек конструкции.

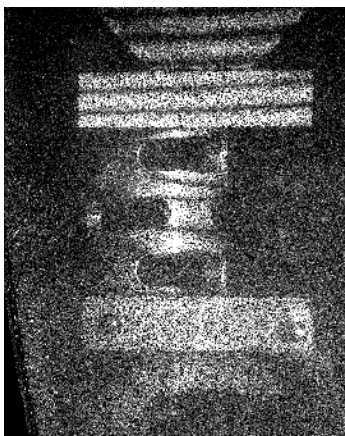
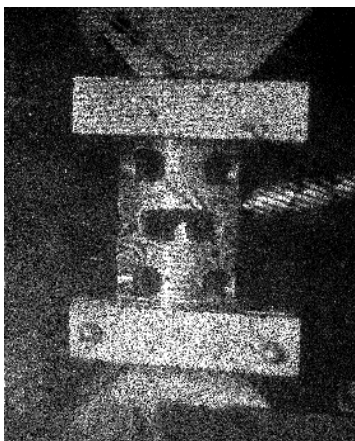


Рис.7. Фотографии интерферограмм

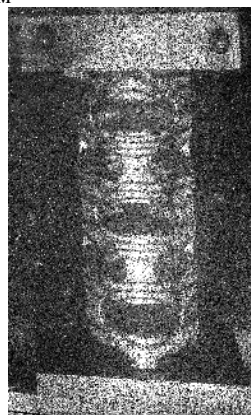
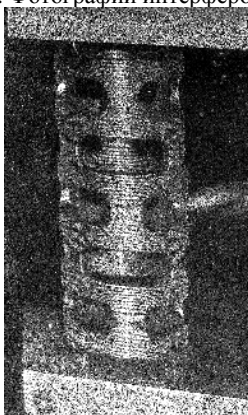


Рис.8. Фотографии интерферограмм

4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

На рис. 9 представлено поле перемещений боковой поверхности эндопротеза при действии осевого сжимающего усилия, полученное численным моделированием НДС методом конечных элементов (МКЭ) [21-22]. На рис. 10 приведена интерференционная картина деформирования внешней поверхности эндопротеза, полученная при экспериментальном исследовании методом голографической интерферометрии. Выбираем характерные точки и сравниваем полученные результаты для численного моделирования и физического эксперимента.

Результат сравнения приведен на рис. 11. Анализ результатов показывает, что в данном случае, модель эндопротеза можно считать достоверной и использовать для дальнейших исследований, например для моделирования сегмента позвоночного столба с установленным эндопротезом. При этом параметры конечно-элементной модели (тип конечных элементов, их количество и расположение зон сгущения-разрежения являлись варьируемыми). В качестве принятых были выбраны параметры, которые обеспечивают сбалансированность численной модели по точности моделирования НДС и по объему конечно-элементной модели.

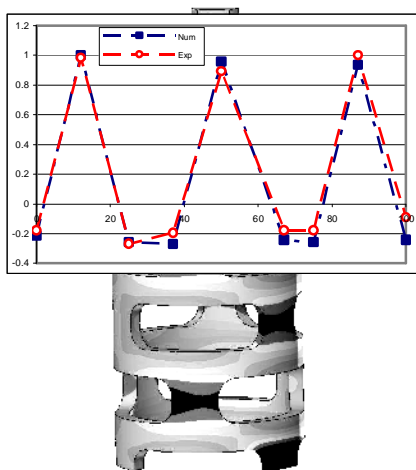


Рис. 9. Поле перемещений боковой поверхности эндопротеза при действии осевого сжимающего усилия, полученное численным моделированием при помощи МКЭ

Рис. 10. Интерференционная картина деформирования внешней поверхности эндопротеза при экспериментальном исследовании методом голографической интерферометрии

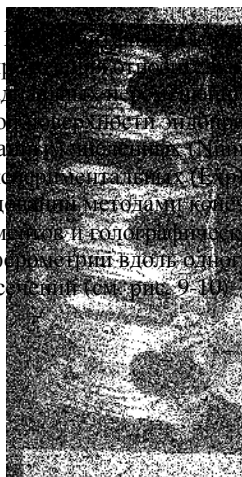


Рис. 10. Интерференционная картина деформирования внешней поверхности эндопротеза при экспериментальном исследовании методом голографической интерферометрии

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Предложен новый подход к расчетно-экспериментальному исследова-

нию элементов биомеханических систем. Он отличается тем, что экспериментальные и численные исследования проводятся параллельно, а их результатом являются достоверные конечно-элементные модели элементов биомеханических систем.

2. Предложено применить схему записи и расшифровки, которые позволяют оперативно решать задачи анализа напряженно-деформированного состояния по набору интерферограмм.

3. Получены экспериментально обоснованные конечно-элементные модели исследуемых эндопротезов, отличающиеся сбалансированностью по густоте конечно-элементной сетки и точности описания напряженно-деформированного состояния.

4. Обоснованы параметры важного элемента биомеханических систем (эндопротеза), которые можно использовать в численной модели многокомпонентной системы “сегмент позвоночника – эндопротез”.

Т.о., разработанный способ расчетно-экспериментального обоснования параметров конечно-элементных моделей эндопротезов отличается высокой достоверностью получаемых результатов и синтезируемых численных моделей. Он может встраиваться в общую цепь расчетно-экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния эндопротезов различного типа, конструктивного исполнения, а также из различных материалов.

Основные направления дальнейших исследований – использование полученных моделей для исследования поведения биомеханической системы, образующейся в результате соединения механической и биологической компонент костно-металлического блока.

Список литературы: 1. *Faciszewski T. et al.* The surgical and medical perioperative complications of anterior spinal fusion surgery in thoracic and lumbar spine in adults. A review of 1223 procedures // *Spine*. –1995. – Vol.20, №14. – p.1592-1599. 2. *Steffen T., Tzantrizos A. et al.* Cages: design and concepts // *Euro Spine*. –2000. –Vol.9(7). –p.5089-5094. 3. *Liebschner M.A.K., Kopperdahl D.L., Rosenberg W.S., Keaveny T.M.* Finite element modeling of the human thoracolumbar spine // *Spine* – 2003. –Vol.28, №6. –p.559-565. 4. *Tobias Pitzen, Fred H. Geisler, Dieter Matthis.* The influence of cancellous bone density on load sharing in human lumbar spine: a comparison between an intact and a surgically altered motion segment. *Eur. Spine J.* (2001) 10:23-29. 5. *V.K. Goel, Y.E. Kim, T.-H. Lim, J.N.Wienstein.* An analytical investigation of the mechanics of spinal instrumentation. *Spine vol. 13*, 9:1003-1011. 6. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 504 с. 7. *Гинзбург В.М., Степанов Б.М.* Голографические измерения. – М.: Наука, 1981. – 296 с. 8. *Роберт К. Эрф.* Голографические неразрушающие исследования – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с. 9. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография – М.: Мир, 1982. –736 с. 10. Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда, в 2-х томах. – М.: Мир, 1982. – 736 с. 11. *Джоунс Р., Уайкс К.* Голографическая и спекл интерферометрия. – М.: Мир, 1986 – 328 с. 12. Методы неразрушающих испытаний /под ред. Р. Шарпа. – М.: Мир, 1972. – 496 с. 13. *Капустин А.А.* Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натуральных конструкций. – В кн.: Физические основы голографии. Л.: ЛИЯФ, 1979.– С.137–159. 14. *Капустин А.А.* Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натуральных конструкций / В кн.: Физические основы голографии. – Л.: ЛИЯФ, 1979.– С.137–159. 15. *Капустин А.А.* Методы, использующие голографическую интерферометрию для спекл-интерферометрических измерений / В кн.: Методические указания /Применение спекл-интерферометрии для контроля качества промышленных изделий. – Горький: ГФ. ВНИИМАШ, 1980.– С.45–53. 16. *Капустин А.А.* К

теории количественной оценки голографических интерферограмм / В кн.: Оптико-когерентные информационно-измерительные системы. – Харьков, 1977.– С.55–60. **17.** *Капустин А.А.* Количественная оценка голографических интерферограмм с помощью спекл-интерферометрии в прочностных исследованиях / В кн.: Оптико-когерентные информационно-измерительные системы. – Харьков, 1977.– С.149–154. **18.** *Капустин А.А.* Исследование и применение методов спекл-интерферометрии, использующих голографические изображения. – Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МФТИ, 1981. – 24 с. **19.** *Капустин А.А., Каледин В.О., Мажура С.О., Рассоха А.А.* О связи методов голографической интерферометрии со спекл-интерферометрией / В кн.: Физические основы голографии. – Л.: ЛИЯФ, 1979.– С.184–194. **20.** *Капустин А.А., Рассоха А.А.* Спекл-интерферометрический подход к расшифровке голографических интерферограмм / В кн.: Тезисы докл. III Всесоюзной конф. по голографии. – Ульяновск, 1978.– С.125–126. **21.** *Ткачук Н.А., Веретельник Ю.В.* К вопросу анализа и синтеза элементов биомеханических систем // Вісник Національного технічного університету “ХПИ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2004.– № 31. – с.149-152. **22.** *Веретельник Ю.В.* Модели элементов биомеханических систем: решение прямых и обратных задач. Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал.– Харків: НТУ “ХПИ”, 2004.– № 2. – с.63-67.

Поступила в редколлегию 12.11.2005

УДК 629.1.032.531.3

С.Н. ВОРОНЦОВ, канд. техн. наук, НТУ “ХПИ”

О.П. ДОБРАНИЦА, канд. техн. наук, **С.П. ПАВЛОВ**, канд. техн. наук,
ВІВВ МВД України

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРАВЛИЧЕСКОГО БУФЕРА СО СТУПЕНЧАТОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Представлено результати експериментального дослідження характеристик гідравлічного буфера із ступінчастою характеристикою. Показано, що математична модель із достатнім ступенем точності описує його роботу.

Results of an experimental research of performances hydraulic buffer with step performance are submitted. It is shown, that the mathematical model with a sufficient degree of an exactitude describes his operation.

Одним из путей обеспечения нелинейности подвески, оказывающей благоприятное влияние на плавность хода транспортного средства, является применение демпфирующего гидравлического буфера (ГБ), вступающего в работу в конце динамического хода опорного катка [1].

Усилие на штоке ГБ с учётом сжатия жидкости определяется исходя из давления в полости прямого хода: