

PACS numbers: 07.60.Ly, 42.30.Ms, 42.40.Ht, 42.40.Kw, 42.40.Mu, 42.70.Ln

Голографическая интерферометрия как способ определения качества наноструктурных покрытий

М. Ю. Барабаш¹, Р. В. Литвин², Д. С. Леонов¹, А. А. Колесниченко¹,
В. Е. Мартыничук¹, Л. В. Рябов¹

¹*Технический центр НАН Украины,
ул. Покровская, 13,
04070 Киев, Украина*

²*Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,
ул. Кржижановского, 3,
03142 Киев, Украина*

Рассмотрены существующие оптические методы неразрушающего контроля качества материалов и наноструктурных покрытий. Показано, что голографические интерферометрические методы обеспечивают высокую точность измерений, простоту интерпретации данных и возможность их использования при контроле широких ассортиментов материалов. Приведена методика цифровой записи голографических и интерферометрических картин с последующей компьютерной обработкой результатов и получением фазового портрета объектов. Описана физическая природа голограмм, принципы их моделирования для повышения механических свойств материалов и покрытий.

Розглянуто наявні оптичні методи неруйнівного контролю якості матеріалів і наноструктурних покриттів. Показано, що голографічні інтерферометричні методи забезпечують високу точність вимірювань, простоту інтерпретації даних і можливість використання їх при контролі широких асортиментів матеріалів. Наведено методику цифрового запису голографічних та інтерферометричних картин з подальшою комп'ютерною обробкою результатів і одержанням фазового портрета об'єктів. Описано фізичну природу голограм, принципи моделювання їх для підвищення механічних властивостей матеріалів і покриттів.

Available optical methods for non-destructive quality control of materials and nanostructured coatings are considered. As shown, the holographic interferometry methods provide high accuracy of measurements, simplicity of the data interpretation and possibility of use for the control of a wide range of materials. Technique of the holographic and interferometric patterns' digital recording followed by computer processing of results and

obtaining an object phase portrait is presented. The physical nature of holograms and the principles of their application for improving the mechanical properties of materials and coatings are described.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, фазовый портрет, наноструктурные покрытия.

Ключові слова: голографічна інтерферометрія, фазовий портрет, наноструктурні покриття.

Key words: holographic interferometry, phase portrait, nanostructured coatings.

(Получено 7 марта 2018 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Используемые методы [1–3] контроля локальных напряжений и дефектов (трещины, раковины и т.п.) должны удовлетворять следующему комплексу требований: высокая точность измерений; простота интерпретации данных; бесконтактный метод измерений; не разрушающая методика проведения измерений; возможность использования для широких ассортиментов материалов. Такие методы необходимые для надёжного и оперативного выявления ослабленных участков и мест будущих возможных разрушений. Анализ используемых методов и средств контроля остаточных напряжений и дефектов показывает, что в отличие от таких известных методов, как рентгеновский, акустический, магнитоупругий и метод вихревых токов, потенциальные возможности голографической интерферометрии удовлетворяют вышечисленному комплексу требований. Существующие голографические интерферометрические методы обеспечивают высокую точность измерений, простоту интерпретации данных и возможность их использования при контроле широких ассортиментов материалов. Однако разработанные к настоящему времени голографические методы используют, как правило, регистрирующие среды на основе желатиновых эмульсий галогенидов серебра, которые требуют мокрой обработки голограмм и значительного времени их получения. Кроме того, эти методы являются частично разрушающими, так как связаны с контактными механическими зондирующими влияниями, такими как сверление несквозных отверстий, вдавливание индентора и т.п. Эти недостатки, ограничивают возможности практического использования этих методов. Перспективно применение методов голографической интерферометрии с использованием цифровых средств регистрации с высоким разрешением, компьютерным анализом полученных опыт-

ным путём голографических интерферограмм и построением фазового портрета, позволяющий визуализировать фазовый рельеф деформации и распределение внутренних напряжений [4, 5]. Регистрация голограмм происходит на реверсивных носителях на основе плёнок аморфных молекулярных полупроводников (АМП), которые обладают высокой чувствительностью, разрешающей способностью, сухим и быстрым проявлением голограмм, цикличностью, возможностью быстрой перезаписи голограмм при оптимизации оптической схемы интерферометра [6–9]. На основе оптических методов диагностики определяют качество поверхности изделия, обнаруживают места локализации концентратов механических напряжений и прогнозируют рабочий ресурс изделия.

Цель работы — разработка методики голографической интерферометрии, исследование с её помощью качества наноструктурных покрытий путём визуализации разностного фазового портрета и его статистических параметров.

2. МЕТОД ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Основные свойства метода голографической интерферометрии (МГИ) являются высокая эффективность, раздел амплитуды во времени, непрерывная запись событий, временная фильтрация. Информативность голограммы может быть настолько высокой, что позволяет обеспечить запись и восстановление с высокой достоверностью тонких деталей световой волны сложной формы. Это свойство позволяет исследовать с помощью МГИ трёхмерные, диффузионные отражающие объекты. Наличие интерференционных полос на изображении отражающего объекта свидетельствует о его деформации. Для прозрачных объектов может быть получена интерференционная картина, свидетельствующая об изменении показателя преломления или толщины объекта. Голографический метод (ГМ) позволяет зарегистрировать волну, рассеянную объектом в момент времени t_1 , а затем сравнить с волной, которая была рассеяна тем же объектом, но в момент времени t_2 .

Рассмотрим голографическую интерферометрию (ГИ) методом двух экспозиций. Для данного метода используется внеосевая схема. Определим отклик от металлического объекта на действие механической силы. Сначала на фотопластинку записывается голограмма объекта в его начальном, ненагруженном состоянии. Для этого объект экспонируют одновременно предметной и опорной волнами. Затем объект нагружают, прикладывая определённое усилие, и делают вторую экспозицию. При освещении фотоплёнки восстанавливающей волной, которая идентична опорной волне на стадии регистрации, наблюдатель через голограмму

увидит трёхмерное мнимое изображение объекта с наложенной на него картиной интерференционных полос. Полосы локализованы в пространстве, не обязательно на поверхности объекта, они несколько смещаются и меняют форму при изменении направления наблюдения [10].

Описание принципов ГИ осуществляют с помощью математического анализа. Голография — линейный процесс, поэтому с её помощью можно добавлять, отнимать и усреднять по времени совокупность волн. Пусть в некоторый момент времени t_1 во внеосевой голографической системе регистрируется оптическая волна с комплексной амплитудой в плоскости голограммы $U_1(x, y)$. В момент времени t_2 на той же пластинке регистрируется вторая волна с амплитудой $U_2(x, y)$. Это голографический процесс двух экспозиций: сначала фотопластинка экспонируется волной $U_1(x, y)$ и одновременно опорной волной $U_R(x, y)$, а затем — волной $U_2(x, y)$ вместе с опорной. При освещении зарегистрированной голограммы волной $U_R(x, y)$ комплексная амплитуда восстановленной волны пропорциональна сумме $U_1(x, y) + U_2(x, y)$, а освещённость определяется выражением

$$I(x, y) = |U_1(x, y) + U_2(x, y)|^2. \quad (1)$$

В применении к интерферометрии $U_1 = U_0(x, y)$ является плоской волной в плоскости голограммы, рассеянной или пропущенной некоторым объектом, а $U_2 = U'_0(x, y)$ — волна того же объекта после деформации. Деформация объекта влияет на фазу волны U_0 , поэтому можем записать

$$\begin{aligned} U_0(x, y) &= a(x, y) \exp[-i\phi(x, y)], \\ U'_0(x, y) &= a(x, y) \exp\{-i[\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)]\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда для освещённости, создаваемой восстановленной волной (1), имеем следующее выражение:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \left| a(x, y) \exp[-i\phi(x, y)] + a(x, y) \exp\{-i[\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)]\} \right|^2 = \\ &\approx 2a^2(x, y) \{1 + \cos[\Delta\phi(x, y)]\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Выражение (3) дает освещённость объекта $a_2(x, y)$, промодулированную интерференционными полосами $2\{1 + \cos[\Delta\phi(x, y)]\}$. Тёмные полосы — линии, вдоль которых значение фазы $\Delta\phi$ является нечётным кратным π , светлые полосы — линии постоянных значений фазы $\Delta\phi$, парные кратные π . В разных случаях изменение фазы $\Delta\phi$ может быть связано с различными физическими вели-

чинами (смещением, поворотом, деформацией, изгибающим моментом, колебаниями, температурой, давлением, концентрацией массы, электрической плотности или напряжением).

3. СХЕМА И АППАРАТУРА РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ

Возможность непрерывной записи оптических волн важна при изучении быстро протекающих событий. Голографические интерферограммы можно записывать почти мгновенно с помощью импульсного лазера, а затем изучать их при восстановлении, используя источник непрерывного света. Свойство временной фильтрации позволяет формировать интерферограммы, проявляющие изменение во времени определённой компоненты волны. Так, метод усреднения по времени используется для изучения механических вибраций [11].

При компьютерном анализе интерференционных картин используют фурье-метод. Однако применение классического фурье-метода часто вызывает ряд трудностей, поскольку необходимо знать точно значение частоты интерференционных полос, а также обеспечить одинаковое расстояние между интерференционными полосами, которое не всегда реализуется на практике. Поэтому нами была использована процедура создания в интерферограммах принудительных (несущих) интерференционных полос.

На рисунке 1, *a* приведена схема голографического интерферо-

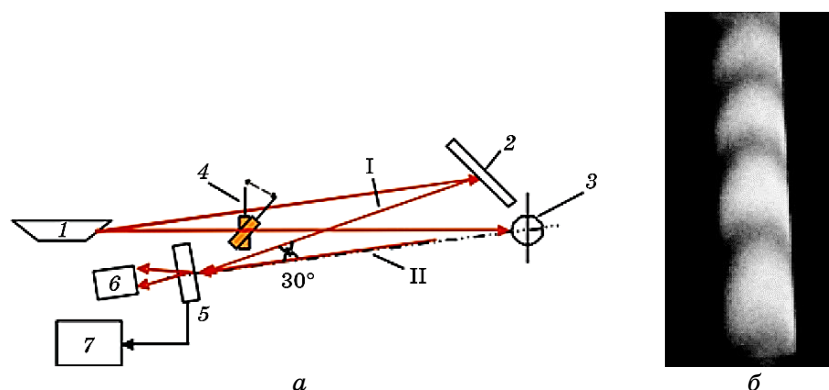


Рис. 1. Схема голографического интерферометра (*a*): 1 — лазер; 2 — металлическое зеркало; 3 — образец; 4 — плоскопараллельная пластинка; 5 — регистрирующая камера адаптивной голографической аппаратуры; 6 — цифровая камера из ПК; 7 — адаптивная голографическая аппаратура для регистрации голограммы; I, II — лучи лазера; (*б*) — фрагмент интерферограммы стержня без покрытия.¹

метра, которая предусматривает применение метода двойной экспозиции с использованием несущих полос и адаптивной голографической аппаратуры для записи голограмм на тонких плёнках АМП (рис. 1, б), показан внешний вид нагруженного стержня без использования полос.

Основное преимущество схемы состоит в том, что она позволяет осуществить построение фазового портрета изделия с помощью компьютерного анализа интерференционных полос.

Получение фазовых характеристик объекта происходит путём преобразования действительных величин интенсивности волновых фронтов объекта в комплексные величины [12]. Такое преобразование осуществляется с помощью прямого и обратного Фурье превращения распределения интенсивности в интерференционной картине [13, 14]. Для этого сначала регистрируется голограмма исходного состояния объекта, а потом плоскопараллельная пластина оборачивается вокруг горизонтальной оси на несколько градусов. В результате интерференции волнового фронта записанной голограммы и волнового фронта объекта после поворота плоскопараллельной пластины в плоскости объекта возникает система параллельных интерференционных полос, которая регистрируется цифровой камерой.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При нагрузке исследуемого объекта происходит деформация его поверхности, что вызывает деформацию системы интерференци-

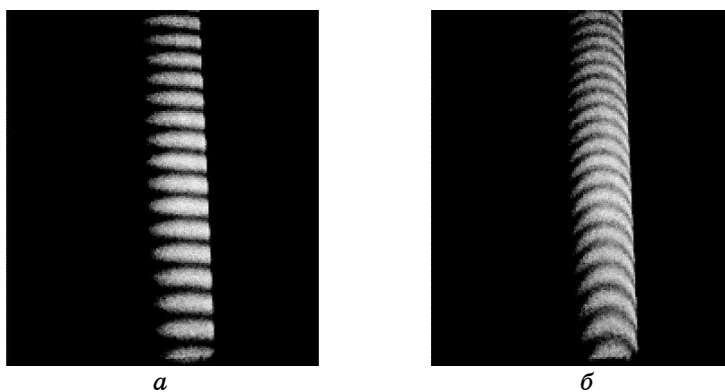


Рис. 2. Интерферограмма стержня без покрытия: *а* — стержня ($T_n = 20^\circ\text{C}$), с введёнными несущими полосами; *б* — суммарная картина нагретого стержня с введёнными несущими полосами. Зависимость интенсивности света в интерферограмме с несущими полосами вдоль центральной линии сечения (вдоль оси Oy) стержня от номера строки.²

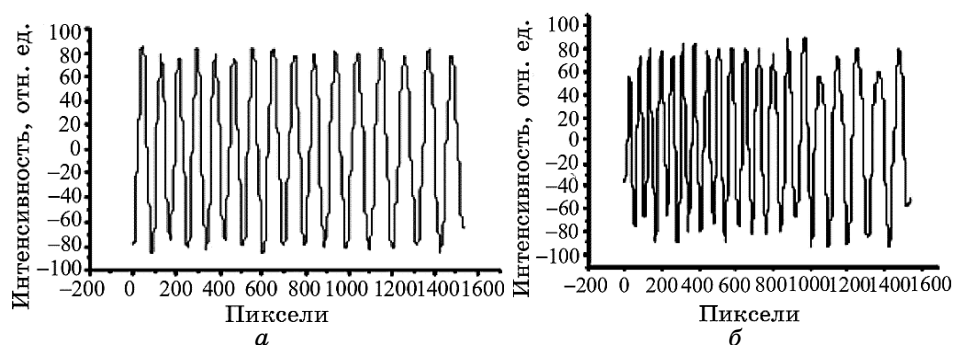


Рис. 3. Интерферограммы несущих полос стержня: *а* — недеформированного, *б* — деформированного.³

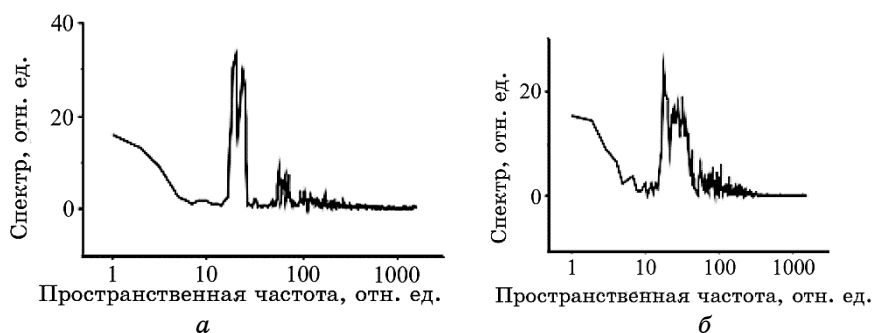


Рис. 4. Фурье-спектр распределения интенсивности интерферограмм несущих полос вдоль центральной линии пересечения стержня, показанного на рис. 2, *а, б*: *а* — ненагруженного стержня, *б* — нагруженного стержня.⁴

онных полос (рис. 2–5). В качестве исследуемого объекта использовали стандартный металлический стержень (диаметр — 12 мм, длина — 110 мм, зона покрытия — 8 мм) без покрытия и с керамическим термобарьерным градиентным покрытием, который обычно используется в электронно-лучевом процессе и носит название свидетель. Поверхность стержня представляет собой цилиндр, поэтому она исследовалась в четырёх положениях, отличающихся друг от друга поворотом на 90° ($0, 90, 180, 270^\circ$) вокруг его вертикальной оси, относительно замка свидетеля расположенного в нижней его части. Нагрузка стержня осуществлялась путём низкотемпературного нагрева, с помощью термостата одеваемого на стержень. После удаления термостата регистрировалась интерференционная картина несущих полос. Температура стержня измерялась в верхней точке стержня с помощью термопары хромель–алюмель.

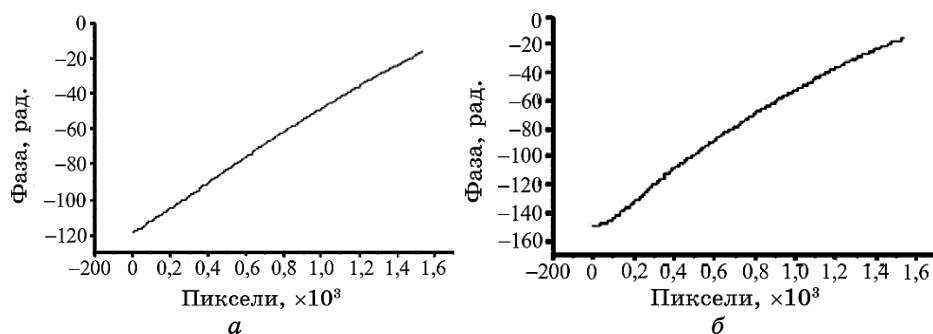


Рис. 5. Изменение величины фазы несущих полос вдоль центральной линии (для различного номера строки интерферограммы) стержня, приведённого на рис. 2, *а*, *б*: *а* — для недеформированного стержня, *б* — деформированного стержня.⁵

На рисунке 2, *а* показан внешний вид ненагруженного стержня с системой несущих полос. В данном случае полосы были образованы путём наклона фазовой пластинки толщиной $\delta = 2$ мм на угол 20° . Изменяя угол наклона, можно регулировать пространственную частоту несущих полос, которые покрывают поверхность ненагруженного стержня. Поскольку направление наклона фазовой пластинки известно, знаки порядков полос могут быть однозначно установлены. Образование интерференционных полос, вызванных деформацией стержня при взаимодействии с несущими полосами, лишь увеличивает или уменьшает частоту несущих полос (расширяет или сужает расстояние между полосами), что позволяет легко определить, увеличивается или уменьшается порядок полосы. При этом ни одна из интерференционных полос не возникает дважды.

Распределение интенсивности света $I_x(y)$ в интерферограмме вдоль линии, выбранной посередине стержня и сканируемой снизу вверх, показано на рис. 3, *а*, *б*. На рисунке 3, *а* наблюдается в основном однородное синусоидальное распределение интенсивности по поверхности. На рисунке 3, *б* наблюдается изменение периода несущих полос, вызванное деформацией стержня. На них видна низкочастотная составляющая интенсивности за счёт гауссовского характера лазерного освещения.

Известно [12], что распределение света на интерферограмме несущих полос записывается в виде:

$$\begin{aligned} I_0(x, y) &= A_0(x, y) + B_0(x, y) \cos[\varphi_0(x, y)] = \\ &= A_0(x, y) + B_0(x, y) \cos[2\pi f(x, y)], \end{aligned} \quad (4)$$

где x, y — координаты точки поверхности исследуемого объекта;

$A_0(x, y)$ — фоновая освещённость; $B_0(x, y)$ — видимость полос; $\varphi_0(x, y)$ — распределение фазы по поверхности исследуемого объекта; f — частота несущих полос в y -направлении.

После определённого действия на исследуемый объект распределение интенсивности на интерферограмме имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} I_m(x, y) &= A_m(x, y) + B_m(x, y) \cos[\varphi_m(x, y)] = \\ &= A_m(x, y) + B_m(x, y) \cos[\varphi_0(x, y) + \Delta\varphi(x, y)], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta\varphi(x, y)$ — распределение фазы по деформированной поверхности объекта, которое необходимо определить.

Рассмотрим метод построения фазового портрета объекта. Применяя к уравнениям (5) преобразование Фурье, получим спектр $F_d(x, i\omega)$ распределения интенсивности интерферограммы вдоль сечения объекта. Поскольку $\Delta\varphi(x, y)$, $A_m(x, y)$ и $B_m(x, y)$ меняются медленно по сравнению с несущей частотой $\omega_0(x, y)$, функция $F_d(x, i\omega)$ будет иметь выраженный пик на частоте ω_0 (рис. 4, а, б). Обнулив значения всех пространственных частот спектров за пределами ω_0 , получим односторонний спектр.

Результат фурье-преобразования рассматриваемых интерферограмм интенсивностей, показанных на рис. 3, а, б, приведён на рис. 4, а, б.

Односторонний спектр [11] является спектром аналитической функции $\varphi(y)$, которая является функцией комплексной переменной z , которая создаётся, когда к действительной функции $I_x(y)$ добавить в качестве мнимой части её преобразование Гилберта:

$$\varphi(y) = I_x(y) + iI_x(y), \quad (6)$$

где $I_x(y) = \pi^{-1} \int \frac{I_x(s)}{y-s} ds$ — преобразование Гилберта.

Аналитическая функция $\gamma(y)$ позволяет определить фазу несущих полос $\varphi(y)$ как \arctg отношения мнимой части аналитической функции $\varphi(y)$ к действительной:

$$\varphi_x(y) = \arctg(\text{Imp}[\gamma(y)] / \text{Re}[\gamma(y)]). \quad (7)$$

Аналитическую функцию $\gamma(y)$ находим, применяя обратное преобразование Фурье к модифицированному спектру $F_d(x, i\omega)$, затем определяем фазу $\varphi_x(y)$ несущих полос для выбранного столбца x изображения интерферограммы. Такое разделение фаз $\varphi_x(y)$, определённое с точностью 2π , связано с периодичностью функции \arctg и характеризуется скачками значений фаз от $-\pi$ до $+\pi$.

Программа обработки данных автоматически определяет и ликвидирует скачки фазы вдоль столбца и между столбиками изображения интерферограммы. Последовательно перебирая таким образом все колонки изображения интерферограммы, получаем значение фазы несущих полос для каждого пикселя изображения объекта и фазовый портрет объекта (рис. 5, а, б).

Сравнение фазовых портретов объекта в первоначальном недеформированном и в деформированном состояниях дает возможность получать разностный фазовый портрет, который и характеризует деформацию объекта. Для количественной оценки разностного фазового портрета объекта использовали статистические характеристики разностного портрета в виде ранга стандартного отклонения ('rang') и самого стандартного отклонения ('sd'), полученные с помощью программы 'ORIGIN'. Стандартное отклонение рассчитывалось как сумма квадрата разницы между средним значением величины разностного фазового портрета и действительным значением величины разностного фазового портрета для каждого пикселя изображения разностного фазового портрета, делённая на количество пикселей. Ранг стандартного отклонения определялся как модуль суммы наибольшего и наименьшего значения разностного фазового портрета объекта. Применяя прямое преобразование Фурье к интерферограмме объекта, модифицируя спектр интерферограммы, превращая его в односторонний и применяя к нему обратное преобразование Фурье, получаем аналитическую функцию распределения интенсивности. Эта функция позволяет построить фазовый портрет перемещений поверхности объекта, который отражает карту распределения поверхностных напряжений объекта.

Анализ распределение фазы $\Delta\varphi(x, y)$ объектов при заданных параметрах оптической схемы позволяет определять значения векторов перемещения точек Δr поверхности исследуемого объекта по формуле: $\Delta\varphi(x, y) = 2\pi/\lambda\Delta r$, где Δr — вектор перемещения точек объекта между экспозициями, λ — длина волны источника когерентного излучения, $\Delta\varphi$ — суммарный сдвиг фаз волн.

По внешнему виду, размещению или наклону несущих полос на интерферограмме можно сделать выводы о характере и динамике деформаций объекта, но невозможно определить направление деформации и локализацию внутренних напряжений. Однако, имея фазовые портреты объекта в первоначальном (рис. 6, а), недеформированном и в деформированном состояниях (рис. 6, б), находим их разницу и получаем разностный фазовый портрет, который и характеризует деформацию объекта.

По расположению и наклону несущих полос на данных интерферограммах можно сделать выводы о характере и динамике деформаций образцов в процессе их термообработки. Анализ фазо-

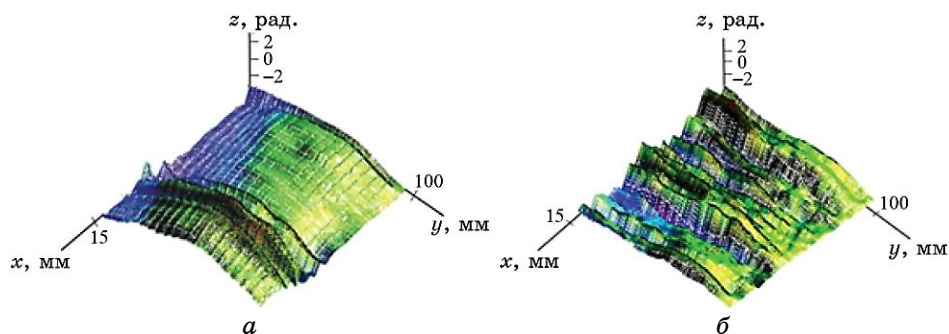


Рис. 6. Диаграмма фазовой поверхности: *a* — недеформированного состояния; *б* — деформированного состояния.⁶

вых портретов покрытий [4] показал, что чем лучше качество покрытия, тем в большем диапазоне температур при нагреве сохраняется структура несущих полос. Были проведены термические испытания образцов. Образец помещался в электропечь с температурой 1150°C на 50 минут, затем его охлаждали до температуры 40°C, обдувая воздушной струей в течение 5 мин. После 5–10 циклов испытаний керамический слой внезапно разрушался. Начальную стадию разрушения зафиксировать не удалось. Образцы, имеющие более упорядоченную структуру интерференционных полос (имели большую связность) выдерживали большее количество циклов нагрева.

На рисунке 7 приведено сравнение интерференционной картины несущих полос, полученной при нагреве металлического стержня с термобарьерным покрытием от 22°C до 25°C, с разрушением термобарьерного покрытия при термическом испытании после 10 цикла нагрева. Разрушение термобарьерного покрытия произошло по стороне стержня, соответствующей положению стержня 180° в оптической установке.

Стержень в этом положении имеет наименее упорядоченную картину интерференционных полос по сравнению с интерференционной картиной в положениях стержня 0, 90, 270° (см. табл.). Стрелками (рис. 7) показаны места значительного искажения структуры полос интерференции и мест предполагаемого начального разрушения покрытия. Локальность нарушения структуры интерференционных полос свидетельствовала о локальных изменениях адгезионных параметров покрытия.

Полученные результаты показывают (рис. 6), что в исследуемом объекте существуют внутренние напряжения, распределённые преимущественно вдоль оси с максимальной фазовой амплитудой 10 рад (± 1 рад, что соответствует деформации поверхности порядка 0,1 мкм).

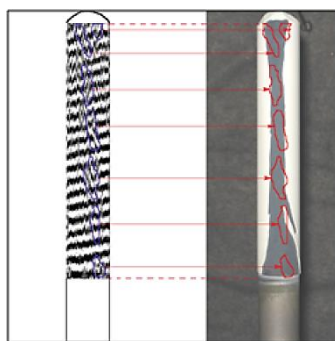


Рис. 7. Сравнение интерференционной картины с результатами термических испытаний.⁷

ТАБЛИЦА. Геометрическое положение стержня.⁸

Положение стержня	Стандартное отклонение	Ранг
0	0,9	5
90	1,3	9
180	1,7	10
270	1,0	8

5. ВЫВОДЫ

Показано, что голографические методы позволяют проводить интерферометрические измерения в автоматическом режиме в реальном времени под управлением компьютера. Разработана методика измерения внутренних концентраторов напряжений на примере металлического стержня и металлического стержня с термобарьерным градиентным нанокристаллическим покрытием. Создан пакет компьютерных программ для анализа интерференционных полос и построения фазовых портретов образцов. Обоснован критерий качества материала наноструктурного покрытия в виде стандартного отклонения величины термоактивированного рельефа поверхности от его среднего значения и ранга. Установлено, что критическими для материала наноструктурного покрытия являются тангенциальные перемещения. Показано, что объект, фазовый портрет которого имеет большее значение стандартного отклонения и ранг, является более дефектным и обладает меньшим рабочим ресурсом. Проведён качественный анализ деформаций стержня под влиянием низкотемпературного нагрева и предложен критерий качества наноструктурного покрытия. Таким критерием является дисперсия фазовой картины термобарьерного градиентного наноструктурного покрытия, которые поз-

воляют прогнозировать рабочий ресурс поверхностных слоёв.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. Ю. Барабаш, Д. О. Гринько, С. О. Сперкач, *Формування наноструктур на темплатах випромінюванням із видимого діапазону* (Київ: ІМФ НАНУ: 2015).
2. Н. П. Алёшин, В. В. Мурашов, А. Г. Евгенов, М. В. Григорьев, Н. А. Щипаков, С. А. Василенко, И. С. Краснов, *Дефектоскопия*, **1**: 48 (2016).
3. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник* (Ред. В. В. Клюев) (Москва: Машиностроение: 1995).
4. Г. Г. Влайков, М. Ю. Барабаш, И. В. Белоусов и др. *Голографическая и спекл интерферометрия* (Киев: ИМФ НАНУ: 2009).
5. Г. Г. Влайков, М. Ю. Барабаш, М. А. Заболотний та ін., *Формування наноструктур темплатним синтезом* (Київ: ІМФ НАНУ: 2010).
6. Е. Л. Александрова, *Физика и техника полупроводников*, **38**, вып. 10: 1153 (2004).
7. И. А. Акимов, Ю. А. Черкасов, М. И. Черкашин, *Сенсибилизированный фотоэффект* (Москва: Наука: 1980).
8. Б. Б. Горбатенко, А. А. Гребенюк, Л. А. Максимова, О. А. Перепелицына, В. П. Рябухо, *Компьютерная оптика*, **34**, № 1: 69 (2010).
9. В. С. Мыльников, *Фотопроводимость полимеров* (Ленинград: Наука: 1990).
10. Ч. Вест, *Голографическая интерферометрия* (Москва: Мир: 1982) (пер. с англ.).
11. M. A. Sutton, J.-J. Orteu, and H. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements* (Columbia, SC, USA: University of South Carolina: 2009).
12. Р. Джоунс, К. Уайкс, *Голографическая и спекл-интерферометрия* (Ред. Г. В. Скроцкий) (Москва: Мир: 1986) (пер. с англ.).
13. В. В. Gorbatenko, L. A. Maksimova, and V. P. Ryabukho, *Optics and Spectroscopy*, **106**, No. 2: 281 (2009).
14. Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, Е. М. Олейник, *Автоматическая сварка*, **10**: 8 (2002).

REFERENCES

1. M. Yu. Barabash, D. O. Grynko, and S. O. Sperkach, *Formuvannya Nanostruktur na Templatax Vyprominyuvannyam iz Vydymogo Diapazonu* (Kyiv: IMF NANU: 2015) (in Ukrainian).
2. N. P. Alyoshin, V. V. Murashov, A. G. Evgenov, M. V. Grigor'ev, N. A. Shchipakov, S. A. Vasilenko, and I. S. Krasnov, *Defektoskopiya*, **1**: 48 (2016) (in Russian).
3. *Nerazrushayushchiy Kontrol' i Diagnostika: Spravochnik* (Ed. V. V. Klyuev) (Moscow: Mashinostroenie: 1995) (in Russian).
4. G. G. Vlaykov, M. Yu. Barabash, I. V. Belousov et al., *Golograficheskaya i*

- Spekl Interferometriya* (Kiev: IMF NANU: 2009) (in Russian).
5. G. G. Vlaykov, M. Yu. Barabash, M. A. Zabolotnyi et al., *Formuvannya Nanostruktur Templatnym Syntezom* (Kyiv: IMF NANU: 2010) (in Ukrainian).
 6. E. L. Aleksandrova, *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, **38**, No. 10: 1153 (2004) (in Russian).
 7. I. A. Akimov, Yu. A. Cherkasov, and M. I. Cherkashin, *Sensibilizirovannyi Fotoeffekt* [Sensitized Photoeffect] (Moscow: Nauka: 1980) (in Russian).
 8. B. B. Gorbatenko, A. A. Grebenyuk, L. A. Maksimova, O. A. Perepelitsyna, and V. P. Ryabukho, *Komp'yuternaya Optika*, **34**, No. 1: 69 (2010) (in Russian).
 9. V. S. Myl'nikov, *Fotoprovodimost' Polimerov* [Photoconduction of Polymers] (Leningrad: Nauka: 1990) (in Russian).
 10. Ch. M. Vest, *Golograficheskaya Interferometriya* [Holographic Interferometry] (Moscow: Mir: 1982) (Russian translation).
 11. M. A. Sutton, J.-J. Orteu, and H. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements* (Columbia, SC, USA: University of South Carolina: 2009).
 12. R. Jones and C. Wykes, *Golograficheskaya i Spekl-Interferometriya* [Holographic and Speckle Interferometry] (Ed. G. V. Skrotskii) (Moscow: Mir: 1986) (Russian translation).
 13. B. B. Gorbatenko, L. A. Maksimova, and V. P. Ryabukho, *Optics and Spectroscopy*, **106**, No. 2: 281 (2009).
 14. L. M. Lobanov, V. A. Pivtorak, V. V. Savitskii, and E. M. Oleynik, *Avtomaticheskaya Svarka*, **10**: 8 (2002) (in Russian).

¹Technical Centre, N.A.S. of Ukraine,
13 Pokrovska Str.,
UA-04070 Kyiv, Ukraine

²I. M. Frantsevich Institute for Problems in Materials Science, N.A.S. of Ukraine,
3 Krzhizhanovsky Str.,
UA-03142 Kyiv, Ukraine

¹ Fig. 1. Scheme of the holographic interferometer (a): 1—laser; 2—metal mirror; 3—sample; 4—plane-parallel plate; 5—recording chamber of the adaptive holographic apparatus; 6—digital camera from a PC; 7—adaptive holographic equipment for recording the hologram; I, II—the laser beams; (b)—a fragment of the interferogram of uncoated rod.

² Fig. 2. Interferogram of a rod without a coating: a—a rod ($T_{\text{н}} = 20^{\circ}\text{C}$) with the entered bearing strips; b—a total picture of a heated rod with driven carrier strips. Dependence of the light intensity in the interferogram with the carrier strips along the central line of the section (along the Oy axis) of the rod from the line number.

³ Fig. 3. Interferograms of the bearing strips of the rod: a—undeformed; b—deformed.

⁴ Fig. 4. The Fourier spectrum of the intensity distribution of interferograms of the carrier bands along the central line of intersection of the rod shown in Fig. 2, a, b: a—unloaded rod; b—loaded rod.

⁵ Fig. 5. Change in the magnitude of phase of the carrier bands along the central line (for different numbers of the interferogram line) of the rod shown in Fig. 2, a, b: a—for the undeformed rod; b—for the deformed rod.

⁶ Fig. 6. Diagram of the phase surface: a—undeformed state; b—deformed state.

⁷ Fig. 7. Comparison of the interference pattern with the results of thermal tests.

⁸ TABLE. Geometric position of the rod.