

07

©1992

КОНТРАСТ ПОЛОС В МЕТОДЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ И КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*А.В.Осинцев, Ю.И.Островский,
Ю.П.Пресняков, В.П.Шепинов*

Получено выражение для контраста полос Юнга в методе спекл-фотографии при случайном изменении микрорельефа поверхности тела. Показано, что метод корреляционной спекл-фотографии обладает более высокой чувствительностью к изменению микрорельефа поверхности, чем метод корреляционной голографической интерферометрии. Экспериментальное подтверждение найденного соотношения чувствительностей обоих методов проводится на примере исследования механического износа и коррозии.

В настоящее время метод двухэкспозиционной спекл-фотографии, основанный на использовании субъективных спекл-структур, получил широкое распространение для регистрации полей тангенциальных перемещений деформируемых тел с квазиплоскими поверхностями [1,2]. Необратимое изменение микрорельефа поверхности тела между экспозициями приводит к деформации спекл-структур записанных изображений тела. Как следствие этого, контраст полос Юнга, наблюдаемых при поточечном сканировании спекл-фотографии нерасширенным лазерным лучом, уменьшается вплоть до их полного исчезновения. Это обстоятельство, с одной стороны, ограничивает область применения метода спекл-фотографии при измерении перемещений (например, в случае больших пластических деформаций), но, с другой — позволяет создать новый метод, так называемый метод корреляционной спекл-фотографии, для изучения процессов, сопровождающихся изменением микрорельефа исследуемой поверхности тела. Метод корреляционной спекл-фотографии используется уже в механике контактного взаимодействия для определения контуров поверхности контакта [3] и определения контактных давлений [4].

В настоящей работе получено выражение для контраста полос Юнга в методе спекл-фотографии при случайном изменении микрорельефа поверхности тела. Проводится сравнение чувствительности к изменению микрорельефа поверхности тела методов корреляционной спекл-

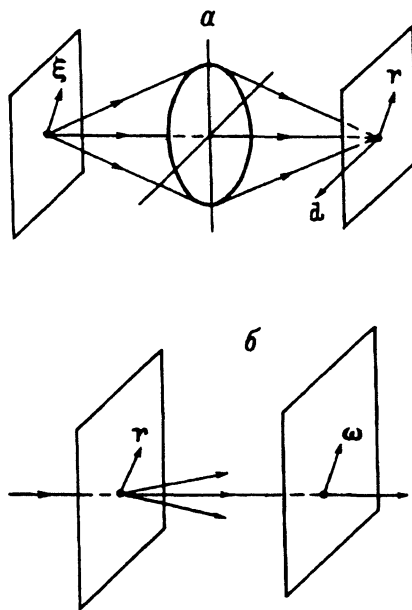


Рис. 1. Схемы регистрации спекл-фотографий (а) и поточечного сканирования дважды экспонированной спекл-фотографии (б).

фотографии и корреляционной голографической интерферометрии. В последнем методе также наблюдают деградацию интерференционных полос при изменении микрорельефа поверхности. Экспериментальное подтверждение найденного соотношения чувствительности обоих методов проводится на примере исследования механического износа и коррозии.

Оптическая схема регистрации спекл-фотографий и принятые обозначения векторов, используемых ниже при анализе контраста полос, показаны на рис. 1, а. Вектор ξ расположен в плоскости поверхности тела, а вектор r в плоскости спекл-фотографии (предполагается, что макрорельеф используемого участка поверхности тела является плоским). Комплексную амплитуду $u(\xi)$ световой волны, отраженной от поверхности тела, запишем в виде

$$u(\xi) = A(\xi)e^{i\varphi(\xi)},$$

где $A(\xi)$ и $\varphi(\xi)$ — амплитуда и фаза волны.

Пусть во время первой экспозиции на фотопластинке регистрируется спекл-структура изображения исходного состояния поверхности исследуемого тела. Распределение интенсивности в плоскости фотопластинки в этом случае обозначается $J_1(r)$. Предположим теперь, что вследствие исследуемого процесса происходит некоторое случайное изменение микрорельефа на части поверхности тела. Комплексная амплитуда $u_1(\xi)$ световой волны после воздействия запишется как

$$u_1(\xi) = u(\xi)e^{i\Psi(\xi)},$$

где $\Psi(\xi)$ — случайная функция, описывающая фазу световой волны изменения микрорельефа.

Заметим, что случайные функции $\varphi(\xi)$ и $\Psi(\xi)$ являются некоррелированными, т.е. $\langle \varphi(\xi)\Psi(\xi) \rangle = 0$.

Вторую экспозицию спекл-фотографии осуществляют после воздействия на исследуемую поверхность и после смещения фотопластины в своей плоскости в направлении и на величину, задаваемую вектором \mathbf{d} . Соответствующее распределение интенсивности, регистрируемое при второй экспозиции, обозначим $J_2(\mathbf{r})$.

При сканировании нерасширенным лазерным лучом полученной таким образом дважды экспонированной спекл-фотографии (рис. 1,б) на экране будет наблюдаться картина полос Юнга с неизменной ориентацией и периодом, которые обусловлены смещением фотопластины. Однако для областей спекл-фотографии, соответствующих тем участкам поверхности тела, где произошло изменение микрорельефа, контраст полос будет уменьшаться.

Среднюю по ансамблю интенсивность $I(\omega)$ в плоскости экрана (рис. 1,б) можно записать в виде [1]

$$I(\omega) = \langle |F(\omega)|^2 \rangle = \langle \left| \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega \mathbf{r}} [J_1(\mathbf{r}) + J_2(\mathbf{r})] d\mathbf{r} \right|^2 \rangle, \quad (1)$$

где ω — пространственная частота, $F(\omega)$ — комплексная амплитуда световой волны в плоскости экрана.

Перепишем выражение (1) следующим образом:

$$I(\omega) = I_1(\omega) + I_2(\omega) + I_{12}(\omega) + I_{21}(\omega), \quad (2)$$

где

$$I_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)} \langle J_1(\mathbf{r}_1) J_1(\mathbf{r}_2) \rangle d\mathbf{r}, \quad (3)$$

$$I_2(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)} \langle J_2(\mathbf{r}_1) J_2(\mathbf{r}_2) \rangle d\mathbf{r}, \quad (4)$$

$$I_{12}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)} \langle J_1(\mathbf{r}_1) J_2(\mathbf{r}_2) \rangle d\mathbf{r} = I_{21}^*(\omega). \quad (5)$$

Будем считать, что оптическая схема на рис. 1,а является линейной пространственно-инвариантной системой с импульсным откликом $h(\mathbf{r} - \xi)$. Тогда выражение для интенсивности $J_1(\mathbf{r}_1)$ можно записать в виде

$$J_1(\mathbf{r}_1) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi_1) h(\mathbf{r}_1 - \xi_1) u^*(\xi_2) h^*(\mathbf{r}_1 - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2.$$

Автокорреляционная функция интенсивности $J_1(\mathbf{r}_1)$ в этом случае будет

$$\langle J_1(\mathbf{r}_1) J_1(\mathbf{r}_2) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \langle u(\xi_1) u^*(\xi_2) u(\xi_3) u^*(\xi_4) \rangle \times$$

$$\times h(\mathbf{r}_1 - \xi_1)h^*(\mathbf{r}_1 - \xi_2)h(\mathbf{r}_1 - \xi_3)h^*(\mathbf{r}_1 - \xi_4)d\xi_1d\xi_2d\xi_3d\xi_4. \quad (6)$$

Корреляционный момент четвертого порядка комплексной амплитуды световой волны можно выразить через корреляционные моменты второго порядка следующим образом [5]:

$$\begin{aligned} \langle u(\xi_1)u^*(\xi_2)u(\xi_3)u^*(\xi_4) \rangle &= \langle u(\xi_1)u^*(\xi_2) \rangle \langle u(\xi_3)u(\xi_4) \rangle + \\ &+ \langle u(\xi_1)u^*(\xi_4) \rangle \langle u(\xi_3)u^*(\xi_2) \rangle. \end{aligned} \quad (7)$$

Для δ -коррелированной комплексной амплитуды $u(\xi)$ выражение (7) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \langle u(\xi_1)u^*(\xi_2)u(\xi_3)u^*(\xi_4) \rangle &= \\ &= \langle |u(\xi_1)|^2 \rangle \langle |u(\xi_3)|^2 \rangle \delta(\xi_1 - \xi_2)\delta(\xi_3 - \xi_4) + \\ &+ \langle |u(\xi_1)|^2 \rangle \langle |u(\xi_3)|^2 \rangle \delta(\xi_1 - \xi_4)\delta(\xi_2 - \xi_3), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\delta(\dots)$ — дельта-функция Дирака.

Учитывая, что освещение объекта равномерное ($\langle |u(\xi)|^2 \rangle = 1$), и подставляя выражение (8) в (6), получим

$$\begin{aligned} \langle J_1(\mathbf{r}_1)J_1(\mathbf{r}_2) \rangle &= \int_{-\infty}^{\infty} |h(\mathbf{r}_1 - \xi_1)|^2 d\xi_1 \int_{-\infty}^{\infty} |h(\mathbf{r}_1 - \xi_3)|^2 d\xi_3 + \\ &+ \int_{-\infty}^{\infty} h(\mathbf{r}_1 - \xi_1)h^*(\mathbf{r}_2 - \xi_1)d\xi_1 \int_{-\infty}^{\infty} h^*(\mathbf{r}_1 - \xi_3)h(\mathbf{r}_2 - \xi_3)d\xi_3. \end{aligned} \quad (9)$$

Полагая, что импульсный отклик нормирован на единицу ($\int_{-\infty}^{\infty} |h(\mathbf{r} - \xi)|^2 d\xi = 1$) выражение (9) можно преобразовать к виду

$$\langle J_1(\mathbf{r}_1)J_1(\mathbf{r}_2) \rangle = 1 + |\Gamma(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)|^2, \quad (10)$$

где $\Gamma(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\mathbf{r}_1 - \xi)h^*(\mathbf{r}_2 - \xi)d\xi$.

Подставляя выражение (10) в (3) и произведя замену переменных $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = \eta$; $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_1$, получим, что

$$\begin{aligned} I_1(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\mathbf{r}} [1 + |\Gamma(\eta)|^2] d\eta d\mathbf{r} \sim \\ &\sim \delta(\omega) + H(\omega), \end{aligned} \quad (11)$$

где $H(\omega)$ — Фурье-образ функции $|\Gamma(\eta)|^2$.

Предполагая, что случайные изменения микрорельефа поверхности не нарушают ее статистических свойств, можно получить, что

$$\langle J_2(\mathbf{r}_1)J_2(\mathbf{r}_2) \rangle = \langle J_1(\mathbf{r}_1)J_1(\mathbf{r}_2) \rangle.$$

Следовательно, выражение (4) принимает вид

$$I_2(\omega) \sim \delta(\omega) + H(\omega). \quad (12)$$

Аналогичным образом можно получить выражение для функции кросскорреляции интенсивностей

$$\begin{aligned} \langle J_1(\mathbf{r}_1)J_2(\mathbf{r}_2) \rangle &= \int_{-\infty}^{\infty} \langle u(\xi_1)u^*(\xi_2)u(\xi_3)e^{i\Psi(\xi_3)}u^*(\xi_4)e^{-i\Psi(\xi_4)} \rangle \times \\ &\times h(\mathbf{r}_1 - \xi_1)h^*(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)h(\mathbf{r}_2 - \xi_2 - \mathbf{d})h^*(\mathbf{r}_2 - \xi_4 - \mathbf{d})d\xi_1d\xi_2d\xi_3d\xi_4 = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\delta(\xi_1 - \xi_2)\delta(\xi_2 - \xi_3)\langle e^{i\Psi(\xi_3)-i\Psi(\xi_4)} \rangle + \right. \\ &\quad \left. + \delta(\xi_1 - \xi_4)\delta(\xi_2 - \xi_3)\langle e^{i\Psi(\xi_3)} \rangle \langle e^{-i\Psi(\xi_4)} \rangle \right] \times \\ &\times h(\mathbf{r}_1 - \xi_1)h^*(\mathbf{r}_1 - \xi_2)h(\mathbf{r}_2 - \xi_3 - \mathbf{d})h^*(\mathbf{r}_2 - \xi_4 - \mathbf{d})d\xi_1d\xi_2d\xi_3d\xi_4 = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} |h(\mathbf{r}_1 - \xi_1)|^2 d\xi_1 \int_{-\infty}^{\infty} |h(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3 - \mathbf{d})|^2 d\xi_2 + \\ &\quad + |\langle e^{i\Psi} \rangle|^2 \int_{-\infty}^{\infty} h(\mathbf{r}_1 - \xi_1)h^*(\mathbf{r}_2 - \xi_1 - \mathbf{d})d\xi_1 \int_{-\infty}^{\infty} h^*(\mathbf{r}_1 - \xi_3) \times \\ &\quad \times h(\mathbf{r}_2 - \xi_3 - \mathbf{d}) = 1 + |\langle e^{i\Psi} \rangle|^2 |\Gamma(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 - \mathbf{d})|^2. \end{aligned}$$

После подстановки полученного выражения в (5) и замены переменных $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = \boldsymbol{\eta}$, $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_1$ получим

$$I_{12}(\omega) \sim \delta(\omega) + |\langle e^{i\Psi} \rangle|^2 e^{-i\omega \mathbf{d}} H(\omega) = I_{21}^* \omega. \quad (13)$$

Подставив (10), (11) и (13) в выражение (1), находим, что

$$I(\omega) \sim 4\delta(\omega) + 2H(\omega)|\langle e^{i\Psi} \rangle|^2 \cos(\omega \mathbf{d}). \quad (14)$$

После фильтрации яркой точки в центре экрана, описываемой дельта-функцией $\delta(\omega)$, выражение (14) принимает вид

$$I(\omega) \sim H(\omega) (1 + |\langle e^{i\Psi} \rangle|^2 \cos(\omega \mathbf{d})). \quad (15)$$

Из выражения (15) можно получить формулу для контраста γ_s полос Юнга

$$\gamma_s = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = |\langle e^{i\Psi} \rangle|^2. \quad (16)$$

Если $p(\Psi)$ — функция плотности вероятности случайных изменений фазы, то

$$\gamma_s = \langle |\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\Psi} p(\Psi) d\Psi|^2 \rangle = \langle \cos \Psi \rangle^2 + \langle \sin \Psi \rangle^2. \quad (17)$$

При исследовании случайных процессов изменения микрорельефа поверхности тела методом корреляционной голографической интерферометрии интенсивность I_g восстановленного изображения равна [6]

$$I_g = 1 + \langle \cos(\varphi_0 + \Psi) \rangle, \quad (18)$$

где φ_0 — регулярная функция изменения фазы предметной волны, дающая несущие интерференционные полосы.

После преобразований выражение (18) принимает вид

$$I_g = 1 + \langle \cos \Psi \rangle \cos \varphi_0 - \langle \sin \Psi \rangle \sin \varphi_0 = 1 + (\langle \cos \Psi \rangle^2 + \langle \sin \Psi \rangle^2)^{1/2} \cos \left(\varphi_0 + \arctg \frac{\langle \sin \Psi \rangle}{\langle \cos \Psi \rangle} \right) \quad (19)$$

Из (19) следует, что контраст γ_g несущих голографических интерференционных полос равен

$$\gamma_g = (\langle \cos \Psi \rangle^2 + \langle \sin \Psi \rangle^2)^{1/2}. \quad (20)$$

Из сравнения выражений (17) и (20) следует, что

$$\gamma_s = \gamma_g^2 \quad (21)$$

Таким образом, метод корреляционной спекл-фотографии обладает более высокой чувствительностью к изменению микрорельефа поверхности, чем метод корреляционной голографической интерферометрии.

Экспериментальная проверка соотношения (21) проводилась на примерах исследования процессов механического износа и коррозии. Одновременная регистрация поверхности образца методом голографической интерферометрии и спекл-фотографии производилась с помощью оптической схемы, показанной на рис. 2. Пучок света от лазера 1 падает на делитель 2. Прошедший через делитель пучок отражается от зеркала 3, расширяется линзой 4 и с помощью зеркала 5 направляется на поверхность образца O . Объектив 6 формирует изображение поверхности образца в плоскости фотопластины 7, на которой регистрируется спекл-фотография. Отраженный от делителя 2 пучок света направляется зеркалом 8 на коллиматор, образованный линзами 9 и 10. Полученная плоская волна, отражаясь от зеркала 11, падает на фотопластинку 12 (опорная волна), на которой регистрируется голограмма поверхности образца. Для обеспечения раздельной записи голограммы и спекл-фотографии

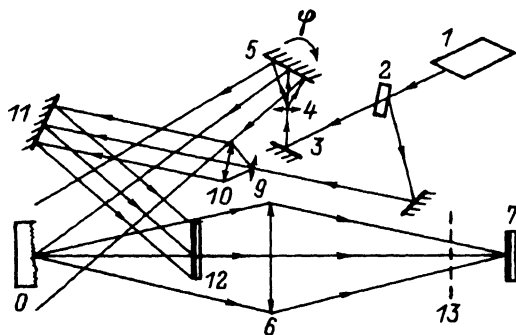


Рис. 2. Оптическая схема одновременной регистрации голограмм спекл-фотографий.

перед последней во время регистрации голограммы устанавливается непрозрачная маска 13.

Регистрация голограммы и спекл-фотографии методом двухэкспозиций производится следующим образом. Сначала на фотопластинке 7 регистрируется исходная спекл-структура изображения образца (1-я экспозиция спекл-фотографии). Затем в оптическую схему устанавливается фотопластинка 12 и на ней регистрируется голограмма исходного состояния поверхности образца (1-я экспозиция голограммы). Перед фотопластинкой 7 в это время находится непрозрачная маска 13. Поверхность образца подвергается механическому износу (или коррозии). После этого зеркало 5 поворачивается на малый угол φ и на пластинке 12 регистрируется голограмма поверхности образца после износа (или коррозии) (2-я экспозиция голограммы). Затем фотопластинка 12 и маска 13 удаляются из схемы, фотопластинка 7 смещается в своей плоскости на величину d и на ней производится регистрация спекл-структуры изображения образца (2-я экспозиция спекл-фотографии). Таким образом, на фотопластинке 12 регистрируются две голограммы поверхности образца до и после механического износа (или коррозии) при смещении источника освещения между экспозициями, а на фотопластинке 7 — две сдвинутые относительно друг друга на величину d спекл-структуры изображения поверхности образца до и после износа поверхности (или коррозии).

При восстановлении световых волн, записанных на дважды экспонированной голограмме, наблюдается изображение поверхности образца, промодулированное эквидистантными интерференционными полосами, вызванными наклоном зеркала 5 на угол φ (рис. 2). Однако в результате износа (или коррозии) микрорельеф поверхности образца изменяется, что приводит к декорреляции восстановленных световых волн и, следовательно, к снижению контраста несущих полос. Заметим, что изменение направления освещения поверхности образца между экспозициями голограммы также приводит к декорреляции восстановленных световых волн, но так как это изменение мало, то соответствующее ему падение контраста полос существенно меньше, чем вызванное износом (или коррозией).

При сканировании дважды экспонированной спекл-фотографии нерасширенным лазерным пучком на экране наблюдается интерференционная

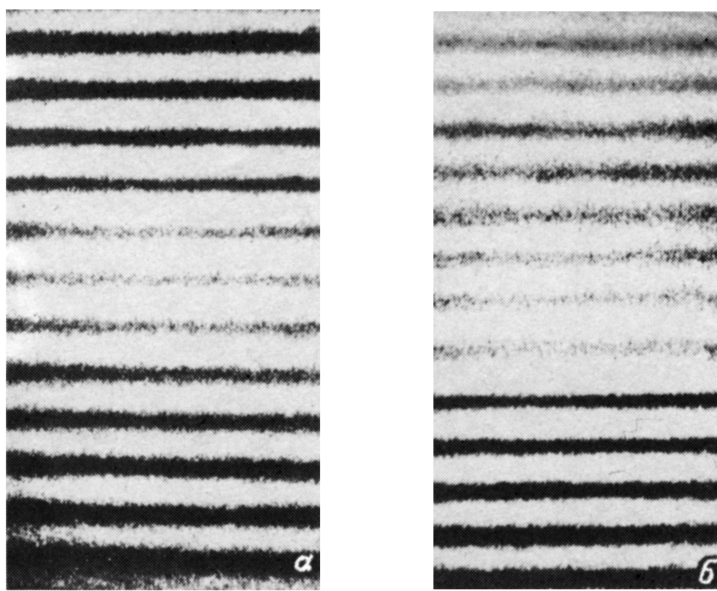


Рис. 3. Голографические интерферограммы поверхности образца при механическом износе (а), при коррозии (б).

картина с постоянной ориентацией и частотой полос Юнга, которые задаются направлением и величиной смещения фотопластинки между экспозициями. Изменение микрорельефа поверхности в зоне воздействия приводит к декорреляции зарегистрированных спекл-структур. В результате контраст полос Юнга уменьшается.

Объектом исследования был образец из материала Д16Т с исходной нерегулярной шероховатостью поверхности $R_a = 1.50$ мкм. Механический износ поверхности образца проводился с помощью абразива, который вводился в зону контакта между образцом и другим телом, причем последнее перемещалось хаотически на поверхности образца. Коррозия поверхности образца производилась щелочью. Как износ, так и коррозия проводились на части поверхности образца, т.е. на поверхности образца существовали области, не подверженные износу или коррозии. Выбранные виды воздействия не меняли яркость образца во время первой и второй экспозиций, следовательно, изменение контраста полос было связано только с воздействием на образец.

На рис. 3 приведены голографические интерферограммы, полученные при износе и коррозии части исследуемой поверхности образца. На интерферограммах хорошо видны области плавного падения контраста несущих полос, обусловленные износом (рис. 3,а) или коррозией (рис. 3,б).

Для определения контраста полос с помощью голограммы восстанавливалось действительное изображение поверхности образца, после чего осуществлялась запись распределения интенсивности в нем с помощью пучка волоконных световодов, торец которых был закреплен в подвижной каретке двухкоординатного потенциометра. Диаметр торца пучка световых волокон не превышал 0.1 периода несущих интерференционных полос. Аналогично производилась регистрация интенсивности картины полос Юнга. В обоих случаях сканирование интерференционной карти-

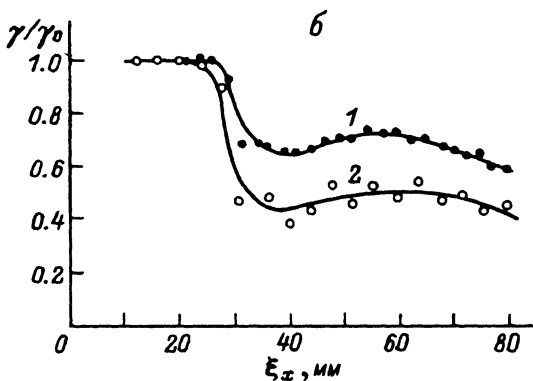
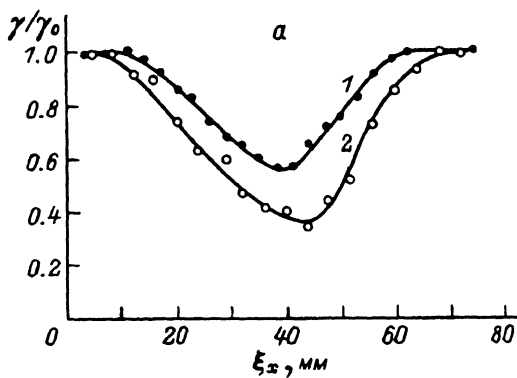


Рис. 4. Зависимости изменения контраста полос поверхности образца при механическом износе (а) и при коррозии (б).

ны осуществлялось по направлению, ортогональному полосам. Измеренные величины контраста нормировались на контраст полос γ_0 вне зоны воздействия.

На рис. 4,а приведены значения контраста полос для различных точек прямой на поверхности образца, полученные при обработке голографической интерферограммы (кривая 1), и полос Юнга в методе спекл-фотографии (кривая 2) для случая механического износа. В пределах погрешности эксперимента соотношение (21) выполняется по всей области износа.

На рис. 4,б приведены значения контраста полос для точек той же прямой на поверхности образца при коррозии. Кривая 1 получена при обработке голографической интерферограммы, а кривая 2 — полос Юнга, наблюдаемых при поточечном сканировании. Соотношение (21) в пределах погрешности эксперимента выполняется во всей области коррозии.

Таким образом, аналитически получено выражение для контраста полос Юнга в методе спекл-фотографии и найдено соотношение между изменением контраста полос в методе голографической интерферометрии и изменением контраста полос Юнга в методе спекл-фотографии при случайном изменении нерегулярного микрорельефа поверхности те-

ла (см. выражение (21)), которое подтверждено экспериментально на примерах исследования механического износа и коррозии. Полученное соотношение показывает, что метод корреляционной спекл-фотографии, в котором изменение контраста полос обусловлено корреляцией интенсивности, является более чувствительным к изменению микрорельефа изучаемой поверхности по сравнению с методом корреляционной голографической интерферометрии, в котором падение контраста полос обусловлено декорреляцией амплитуд.

Метод корреляционной голографической и метод спекл-интерферометрии дополняют друг друга и расширяют диапазон изменений микрорельефа поверхности тела, которые могут быть изучены. Помимо изучения коррозии и износа эти методы могут быть применены для исследования механического контакта тел, абразивной и кавитационной эрозии, напыления, испарения и других процессов.

Список литературы

- [1] *Laser Speckle and Related Phenomena* / Ed. J.C.Dainty. Berlin: Springer Verlag, 1975. 342 p.
- [2] *Speckle Metrology* / Ed. R. K.Erf. New York; San Francisco; London: Academic Press, 1978. 331 p.
- [3] *Осинцев А.В., Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 7. С. 1420–1423.
- [4] *Осинцев А.В., Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 4. С. 107–111
- [5] *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1976. Ч. 1. 361 с.
- [6] *Петров К.Н., Пресняков Ю.П.* // Опт. и спектр. 1978. Т. 44. Вып. 2. С. 309–311.

Физико-технический
институт
им. А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
2 сентября 1991 г.