

07; 12

ИЗУЧЕНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*А. П. Дмитриев, Г. В. Дрейден, А. В. Осинцев, Ю. И. Островский,
В. П. Щепинов, М. И. Эттингер, В. В. Яковлев*

Для определения степени эрозии поверхности предложено использовать метод корреляционной голографической интерферометрии. Получены аналитические зависимости между контрастом полос и величинами, характеризующими изменение микрорельефа поверхности образца вследствие эрозионного воздействия. Показано, что использование метода корреляционной голографической интерферометрии позволяет определить три параметра, характеризующие степень эрозии поверхности: сдвиг средней линии микрорельефа, дисперсию перпендикулярной составляющей и дисперсию параллельной составляющей.

Проблема кавитации — одна из важнейших в современном гидроагрегате и судостроении. Кавитирующая жидкость разрушает рабочие поверхности турбинных лопастей судовых винтов, снижает скорость и коэффициент полезного действия машин и агрегатов.

При определении кавитационной стойкости образцы материалов испытывают в лабораторных установках различного типа. Относительную кавитационную стойкость определяют или путем сравнения весовых потерь за одинаковое время воздействия с одинаковой интенсивностью, или путем сравнения времени воздействия, необходимого для достижения одинаковых весовых потерь. Такие испытания, как правило, очень длительны (сотни часов). Для определения зон и интенсивности кавитационной эрозии обычно используют метод легкоразрушаемых покрытий. Степень же эрозии определяют только качественно, по виду разрушенного покрытия.

Для количественного решения этой задачи можно использовать метод голографической интерферометрии [1].

Известно, что контраст интерференционных полос в методе голографической интерферометрии для тел с диффузными поверхностями зависит от степени корреляции световых волн, отраженных объектом во время первой и второй экспозиций. Изменение микрорельефа поверхности тела между экспозициями приводит к декорреляции отраженных ею световых волн и, как следствие, к падению контраста интерференционных полос [2]. Таким образом, по изменению контраста полос можно судить об изменениях, произошедших с микрорельефом поверхности, и исследовать различные процессы. Это явление было использовано для определения фактической и номинальной поверхностей контакта соприкасающихся тел [3-5], для исследования процесса коррозии [6, 7], выявления дефектов структуры изделий микроэлектроники [8]. В соответствии с изложенным выше физическим принципом мы будем называть этот метод корреляционной голографической интерферометрией.

В настоящей работе устанавливается теоретическая связь контраста интерференционных полос с параметрами, характеризующими изменение микрорельефа поверхности образца вследствие кавитационного воздействия. Приводится экспериментальное подтверждение полученных соотношений.

Во время кавитационного воздействия происходит изменение микрорельефа поверхности образца. Обозначим через A_1 и A_2 комплексные амплитуды восстановленных объектных волн до и после кавитационного воздействия

$$A_1 = a_1 \exp(-i\varphi), \quad A_2 = a_2 \exp(-i\varphi_2),$$

где a_1 , a_2 и φ_1 , φ_2 — амплитуды и фазы предметных волн.

Интерференционная картина, наблюдаемая при одновременном восстановлении предметных волн, описывается распределением интенсивности I

$$I = \langle |A_1 - A_2|^2 \rangle, \quad (1)$$

где $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по площадке поверхности объекта, соответствующей пределу разрешения оптической системы. Размер этой площадки существенно превышает характерный поперечный размер микронеровностей, т. е. предполагается, что оптическая система не разрешает микроструктуры поверхности. Допустим теперь, что фазы φ_1 , φ_2 и амплитуды a_1 , a_2 статистически независимы, и после несложных преобразований получим

$$I = \langle a_1^2 \rangle + \langle a_2^2 \rangle + 2 \langle a_1 a_2 \rangle \langle \cos \Delta\varphi \rangle, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ — фазовый сдвиг, обусловленный изменением микрорельефа поверхности вследствие эрозионного воздействия.

Рассмотрим теперь величину $\langle \cos \varphi \rangle$. Прежде всего от усреднения по площадке, содержащей большое число элементов микрорельефа, перейдем к усреднению по ансамблю. Для этого введем функцию распределения $f(\mathbf{q})$, где \mathbf{q} — вектор перемещения точки поверхности тела в результате эрозионного воздействия. Вектор \mathbf{q} связан с изменением фазы основным соотношением голографической интерферометрии

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{l}_s - \mathbf{l}_1) \mathbf{q}, \quad (3)$$

где \mathbf{l}_s и \mathbf{l}_1 — единичные векторы направлений освещения и наблюдения рассматриваемой точки поверхности тела соответственно.

Отсюда

$$\langle \cos \Delta\varphi \rangle = \int \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{l}_s - \mathbf{l}_1) \mathbf{q} \right] f(\mathbf{q}) d\mathbf{q}. \quad (4)$$

Функция распределения $f(\mathbf{q})$, вообще говоря, неизвестна. Будем считать ее гауссовой, что, по-видимому, справедливо, особенно если учесть, что за время эрозионного воздействия каждая точка микрорельефа испытывает большое число смещений, т. е. \mathbf{q} является суммой большого числа случайных слагаемых. Тогда для $f(\mathbf{q})$ можно записать следующее выражение:

$$f(\mathbf{q}) = f(q_{\parallel}, q_{\perp}) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \Delta_{\parallel}^2 \Delta_{\perp}} \exp \left[-\frac{q_{\parallel}^2}{2\Delta_{\parallel}^2} - \frac{(q_{\perp} - \bar{q}_{\perp})^2}{2\Delta_{\perp}^2} \right], \quad (5)$$

где q_{\parallel} и q_{\perp} — параллельная и перпендикулярная к поверхности тела составляющие вектора \mathbf{q} . Величина \bar{q}_{\perp} равна смещению макрорельефа (средней поверхности микрорельефа) вследствие эрозии, а Δ_{\parallel} и Δ_{\perp} — дисперсии q_{\parallel} и $(q_{\perp} - \bar{q}_{\perp})$ соответственно. Величины Δ_{\parallel} и Δ_{\perp} характеризуют степень декорреляции микрорельефа поверхности вследствие эрозии.

Подставляя (5) в (4) и выполняя интегрирование, получим

$$\langle \cos \Delta\varphi \rangle = \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (l_{s,\perp} - l_{1,\perp}) \bar{q}_{\perp} \right] \exp \left[-\frac{\pi \Delta_{\parallel}^2}{\lambda} (l_{s,\perp} - l_{1,\perp})^2 - \frac{\pi \Delta_{\perp}^2}{\lambda} (l_{s,\parallel} - l_{1,\parallel})^2 \right], \quad (6)$$

где $l_{s,\perp}$ и $l_{1,\perp}$ — перпендикулярные к поверхности составляющие единичных векторов \mathbf{l}_s и \mathbf{l}_1 , а $l_{s,\parallel}$ и $l_{1,\parallel}$ — параллельные составляющие тех же векторов.

Первый множитель в выражении (6) связан с деформацией средней поверхности микрорельефа и отвечает за форму полос в интерференционной кар-

тине. Второй сомножитель обусловлен декорреляцией микрорельефа и описывает падение контраста интерференционных полос.

Уравнение интерференционных полос, образованных вследствие деформации средней поверхности микрорельефа, имеет вид

$$n\lambda = (l_{s, \perp} - l_{1, \perp}) \bar{q}_{\perp}, \quad (7)$$

где n — порядок интерференционной полосы.

Введя в уравнение (7) угол освещения α_s и угол наблюдения α_1 , отсчитываемые от нормали к поверхности тела в рассматриваемой точке, найдем \bar{q}_{\perp}

$$\bar{q}_{\perp} = \frac{\lambda n}{\cos \alpha_s + \cos \alpha_1}. \quad (8)$$

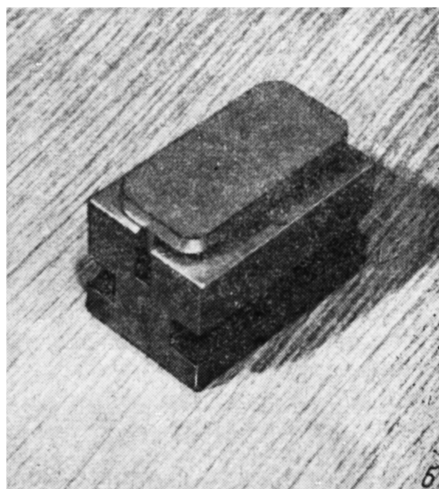
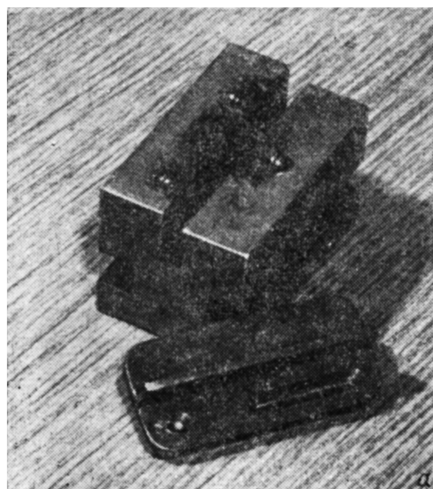


Рис. 1. Исследуемый образец, установленный на держателе (а), и устройство возврата образца (б).

Используя выражения (2) и (6) для контраста полос $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, получим

$$V = 2 \left(\frac{\langle a_1^2 \rangle + \langle a_2^2 \rangle}{\langle a_1 a_2 \rangle} \right)^{-1} \exp \left[-\frac{2\pi^2}{\lambda^2} (\cos \alpha_s + \cos \alpha_1)^2 \Delta_1^2 - \frac{2\pi^2}{\lambda^2} (\sin \alpha_s - \sin \alpha_1)^2 \Delta_1^2 \right]. \quad (9)$$

Будем считать, что случайный характер эрозионного воздействия переносится только на фазу, а не на амплитуду волны т. е. $a_1 = a_2$. Тогда выражение (9) принимает вид

$$\ln \frac{1}{V} = \frac{2\pi^2}{\lambda^2} (\cos \alpha_s + \cos \alpha_1)^2 \Delta_1^2 + \frac{2\pi^2}{\lambda^2} (\sin \alpha_s - \sin \alpha_1)^2 \Delta_1^2. \quad (10)$$

Формула (10) содержит два неизвестных V_1 и Δ_1 . Для их определения необходимо зарегистрировать две голограммы исследуемого тела под различными углами наблюдения α_1 и α_2 . Тогда можно записать систему двух уравнений с двумя неизвестными.

$$\begin{aligned} \ln \frac{1}{V_1} &= \frac{2\pi^2}{\lambda^2} [(\cos \alpha_s + \cos \alpha_1)^2 \Delta_1^2 + (\sin \alpha_s - \sin \alpha_1)^2 \Delta_1^2], \\ \ln \frac{1}{V_2} &= \frac{2\pi^2}{\lambda^2} [(\cos \alpha_s + \cos \alpha_2)^2 \Delta_1^2 + (\sin \alpha_s - \sin \alpha_2)^2 \Delta_1^2], \end{aligned} \quad (11)$$

где V_1 и V_2 — контраст полос, восстановленных с голограмм при углах наблюдения α_1 и α_2 соответственно. Решение системы (11) позволяет определить Δ_{\perp} и Δ_{\parallel} .

Экспериментальная проверка метода осуществлялась на специально изготовленных образцах, которые подвергались эрозионному воздействию в кавитационно-эрозионном стенде Производственного объединения «Ленинградский Металлический завод». Используемый стенд относится к установкам проточ-

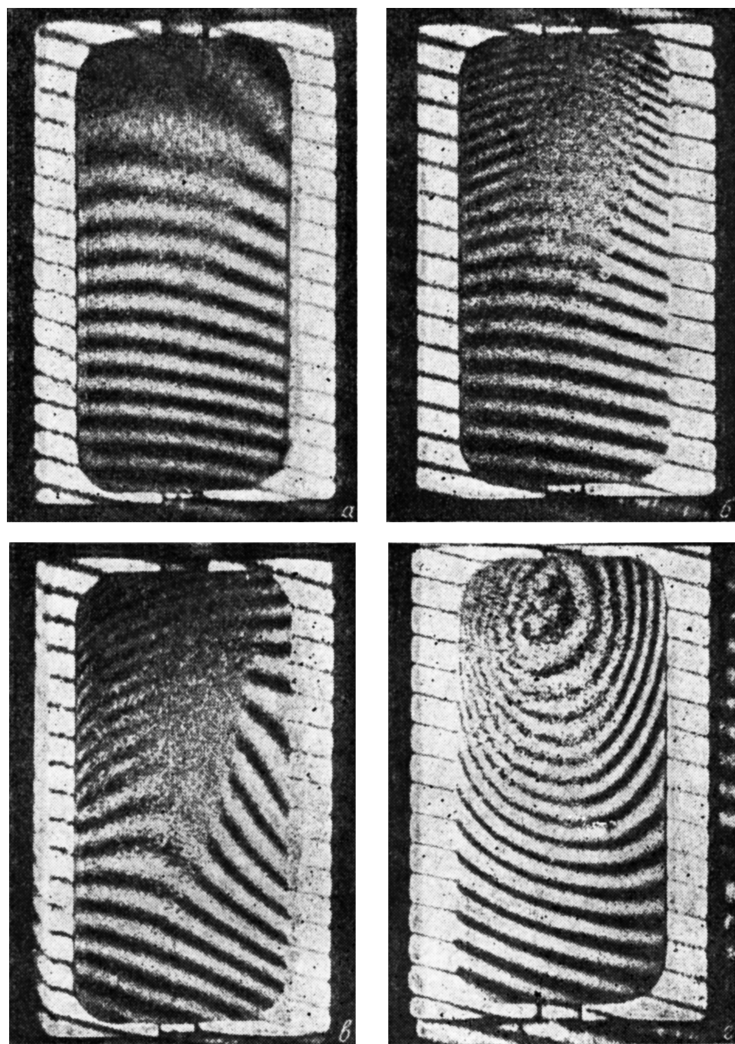


Рис. 2. Интерферограммы образцов с различной шероховатостью поверхности и временем эрозионного воздействия T .

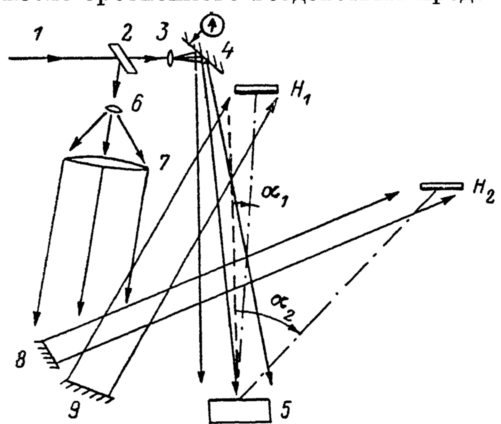
R_a , мкм: а, б, в — 2.0; г — 0.55, T , мин: а — 20; б, в — 30; г — 40.

ного типа. Рабочей частью стенда является кавитационное сопло, представляющее собой конфузorno-диффузорный канал прямоугольного сечения. Угол конфузора на выходе из щели размером 4×60 мм составляет 12° . Образцы размером в плане 28×60 мм, изготовленные из конструкционной нержавеющей стали 1X18H10T, крепились к боковой стенке сопла. Максимальная скорость потока по сечениям сопла составляла 39 м/с.

Голографические интерферограммы образцов в полосах конечной ширины регистрировались методом двух экспозиций. Во время голографирования образец устанавливался в специальном держателе, который позволял после первой экспозиции удалять их из схемы и подвергать эрозионному воздействию

в стенде, а затем возвращать обратно. Фотографии образца и держателя приведены на рис. 1.

Голографические интерферограммы образцов в полосах конечной ширины после эрозионного воздействия представлены на рис. 2. Из сравнения картин



полос образцов, имеющих одинаковую исходную шероховатость, можно заметить, что при увеличении времени эрозионного воздействия полосы искривляются и смещаются, а контраст их падает. Это свидетельствует о необратимом

Рис. 3. Оптическая схема регистрации интерферограмм.

1 — луч лазера; 2 — делитель; 3, 6 — расширители пучка; 4 — поворотное зеркало; 5 — исследуемый образец; 7 — коллимирующая линза; 8, 9 — зеркала; H_1, H_2 — интерферограммы.

формоизменении как средней поверхности микрорельефа, так и отдельных его элементов.

На рис. 3 приведена оптическая схема двухголограммного интерферометра, в которой исследуемый образец освещается нормально к его поверхности ($\alpha_3=0$). Голограмма H_1 обеспечивала направление наблюдения, нормальное

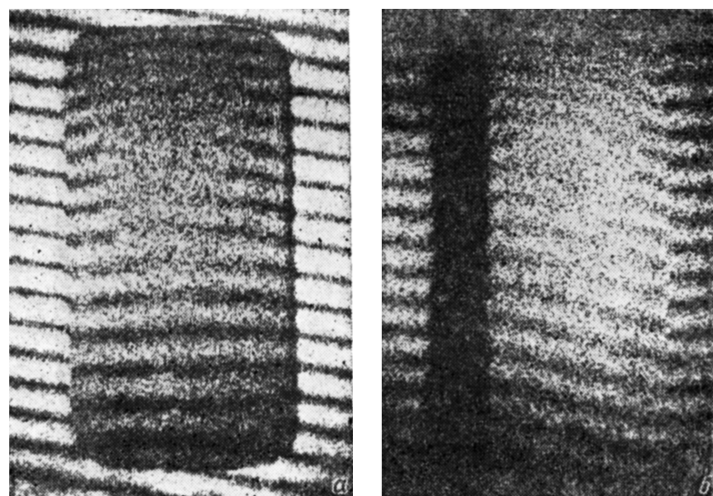


Рис. 4. Интерферограммы образцов, зарегистрированные при различных углах наблюдения α . α , град: а — 0, б — 45; R_0 , мкм: а, б — 20.

к поверхности образца ($\alpha_1 \approx 0$), а голограмма H_2 позволяла наблюдать образец под углом $\alpha_2=45^\circ$. Подставив эти величины углов в систему уравнений (11) и решив ее, получим

$$\Delta_1 = \frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi} \left(\ln \frac{1}{V_1} \right)^{1/2},$$

$$\Delta_1 = \frac{1}{\pi} \left(\ln \frac{1}{V^2} - \frac{1+\sqrt{2}}{4\sqrt{2}} \ln \frac{1}{V_1} \right)^{1/2}. \quad (12)$$

Интерферограммы образца, экспонированного в эрозионном стенде в течение 25 мин, приведены на рис. 4. Контраст интерференционных полос опреде-

являлся по центральному продольному сечению образца, причем полученные величины нормировались на величину контраста в зоне, не подверженной эрозии. На рис. 5, а показаны зависимости контраста полос по рассматриваемому сечению образца, а на рис. 5, б приведены найденные с помощью уравнений (12) значения Δ_{\perp} и Δ_{\parallel} . Дисперсия Δ_{\perp} возрастает и достигает максимального значения при $x=45$ мм, в то время как дисперсия Δ_{\parallel} на большей части образца практически постоянна, и только на конце образца наблюдается ее осцилляция.

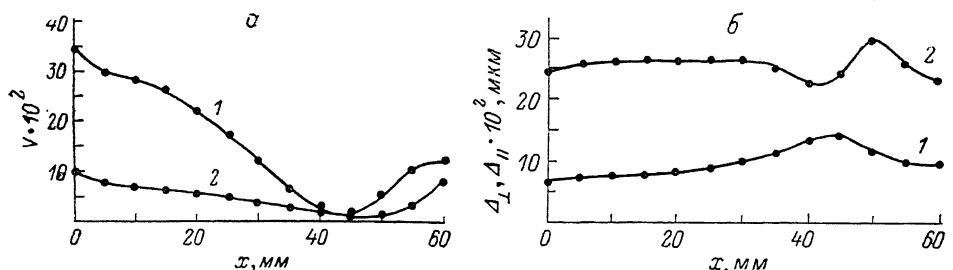


Рис. 5. Зависимости контраста интерференционных полос при различных углах наблюдения (а) и зависимости дисперсии вектора смещения поверхности (б).

а: 1 — с интерферограммы H_1 ($\alpha=0$), 2 — с интерферограммы H_2 ($\alpha=45^\circ$); б: 1 — нормальной к поверхности, 2 — тангенциальной.

Дисперсия перемещения в тангенциальном направлении существенно больше, чем дисперсия в нормальном направлении.

Проведенные эксперименты показали возможность определения зон и степени эрозии образца и ее пространственного распределения методом корреляционной голографической интерферометрии. По сравнению с существующими методами предлагаемый метод позволяет определять степень эрозии поверхности количественно, значительно уменьшает необходимое время эрозионного воздействия и тем самым трудоемкость испытаний. Метод позволяет исследовать эрозию на ее ранних стадиях. Таким образом, предлагаемый метод можно рассматривать как количественный неразрушающий метод контроля процесса кавитационной эрозии.

Литература

- [1] Дрейден Г. В., Осинцев А. В., Островский Ю. И. и др. А. С. № 1239590. БИ. 1986. № 23.
- [2] Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 339 с.
- [3] Atkinson J. I., Labor M. J. // Proc. Conf. «Applications of Holography and Optical Data Processing». Jerusalem, 1976. P. 289—298.
- [4] Щепиков В. П., Морозов Б. А., Новиков С. А., Аистов В. С. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 9. С. 1926—1928.
- [5] Осинцев А. В., Островский Ю. И., Щепинов В. Л., Яковлев В. В. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 4. С. 202—204.
- [6] Ashton R. A., Slovín D., Gerritsen H. J. // Appl. Opt. Vol. 10. P. 440—441.
- [7] Петров К. Н., Пресняков Ю. П. // Опт. и спектр. 1978. Т. 44. Вып. 2. С. 309—311.
- [8] Кудряев В. Н., Панибратцев Ю. А., Сафронов Г. С. и др. // Микроэлектроника. 1979. № 8. С. 166—171.

Поступило в Редакцию
10 февраля 1988 г.