

8. Матвийчук К. С. К исследованию технической устойчивости системы связанных тел с элементами демпфирования // Прикл. механика.— 1983.— Т. 19, № 5.
9. Матвийчук К. С. О методе сравнения для дифференциальных уравнений, близких к гиперболическим // Дифференц. уравнения.— 1984.— Т. 20, № 11.
10. Матвийчук К. С. О технической устойчивости некоторых систем с распределенными параметрами // Прикл. механика.— 1985.— Т. 21, № 8.
11. Матвийчук К. С. О технической устойчивости нелинейных динамических систем с медленными и быстрыми движениями // ДАН УССР. Сер. А.— 1986.— № 2.
12. Матвийчук К. С. О неравенствах для решений некоторых нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных // Мат. физика и нелинейн. механика.— 1986.— № 5 (39).
13. Матвийчук К. С. Техническая устойчивость параметрически возбуждаемых распределенных процессов // ПММ.— 1986.— Т. 50, № 2.
14. Матвийчук К. С. Исследование устойчивости прямолинейных трубопроводов с транспортируемой жидкостью // Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.— Ивано-Франковск, 1985.
15. Матвийчук К. С. Об условиях устойчивости нелинейных параметрически возбуждаемых распределенных процессов // Вычисл. и прикл. математика.— 1986.— № 58.
16. Матвийчук К. С. Техническая устойчивость нелинейных параметрически возбуждаемых распределенных процессов // Дифференц. уравнения.— 1986.— Т. 22, № 11.
17. Матвийчук К. С. Условия технической устойчивости нелинейных эволюционных систем // Вычисл. и прикл. математика.— 1988.— № 66.
18. Матвийчук К. С. О технической устойчивости параметрически возбуждаемых распределенных процессов // Мат. методы и физ.-мех. поля.— 1987.— № 26.
19. Феодосьев В. И. О колебаниях и устойчивости трубы при протекании через нее жидкости // Инж. сб.— 1951.— Т. 10.
20. Мовчан А. А. Об одной задаче устойчивости трубы при протекании через нее жидкости // ПММ.— 1965.— Т. 29, № 4.
21. Светлицкий В. А. Механика трубопроводов и шлангов.— М.: Машиностроение, 1982.
22. Стейн Р. А., Тобринер М. В. Колебания трубы с протекающей по ней жидкостью // Прикл. механика.— 1970.— № 4.
23. Скоробогатько В. Я. Исследования по качественной теории дифференциальных уравнений с частными производными.— Киев: Наук. думка, 1980.
24. Власов В. В. Общая теория оболочек и ее приложения в технике.— М.; Л.: Гостехиздат, 1949.
25. Зубов В. И. Методы А. М. Ляпунова и их применение.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1957.
26. Валеев К. Г., Финин Г. С. Построение функций Ляпунова.— Киев: Наук. думка, 1981.
27. Leipholz H. Stability of elastic systems.— Alphen aan den Rijn: Sijthoff et Noordhoff, 1980.
28. Szarski J. Differential inequalities.— Warszawa: PVN, 1967.

г. Киев

Поступила 7/VI 1988 г.,
в окончательном варианте — 19/VIII 1988 г.

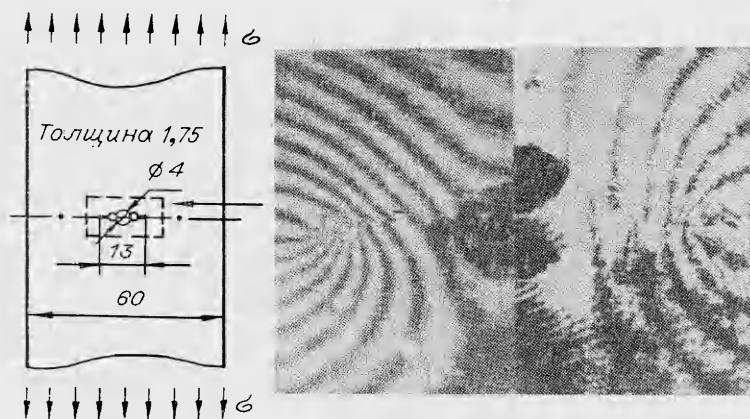
УДК 620.171.5

В. П. Тырин

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

Анализируются способы определения коэффициента интенсивности напряжений K_I по экспериментально найденным перемещениям в области вершины трещины. Для измерения перемещений используется метод голографической интерферометрии при записи голограмм по схеме на встречных пучках. С целью повышения качества голограмм и точности рекомендуется на поверхность конструкции наносить высокочастотный металлизированный растр. Описана методика нахождения K_I по раскрытию трещины. Приведены примеры исследования тарировочного образца и оребренной панели с усталостной трещиной.

Коэффициент интенсивности напряжений при изучении конструкций с трещинами может быть найден по экспериментально измеренным перемещениям в области вершины трещины [1—3]. Для этого используются



Р и с. 1

как перемещения u , v в плоскости образца [1, 2], так и перемещения w из плоскости образца [3]. Экспериментально все три компонента вектора перемещения могут быть определены с помощью метода голографической интерферометрии [4]. Для получения исходной информации — записи голограмм — возможны две схемы: внеосевая [4] и на встречных пучках [5]. При исследовании реальных конструкций или их элементов предпочтительнее вторая схема, так как она позволяет укрепить регистрирующую среду на поверхности рассматриваемого объекта — накладной голографический интерферометр, что существенно снижает требования к виброизоляции как испытательного оборудования, так и оптических элементов. Кроме того, исключается запись перемещений объекта как единого целого, что упрощает обработку интерференционных картин.

Однако наряду с преимуществами такая схема записи голограмм обладает существенным недостатком — низкое качество голограмм. Голограммы могут быть восстановлены только в пучке света лазера, использованного при записи, картины полос интерференции — интерферограммы наблюдаются только в отраженных от голограммы пучках. Первое обстоятельство приводит к появлению спекла, что затрудняет регистрацию полос интерференции в областях с высокими градиентами перемещений, второе — к тому, что наибольший вклад в образование полос интерференции вносит перемещение w . Эта компонента вектора перемещения находится с большой точностью, а точность определения компонент u и v уменьшается с увеличением w . В то же время при исследовании реальных конструкций величина \bar{K}_T в большинстве случаев может быть вычислена только по перемещениям u или v . Это объясняется тем, что перемещение $u(v)$ определяется относительно вершины трещины, а перемещение w — относительно удаленной от трещины области конструкции, где $w = \text{const}$. Выделить такую область, как правило, невозможно. Улучшить качество голограмм и, следовательно, снизить влияние w и повысить точность нахождения u и v позволяет нанесение на поверхность объекта высокочастотного металлизированного раstra. Технология изготовления и нанесения таких растров описана в [6]. В этом случае голограммы, получаемые по схеме на встречных пучках, восстанавливаются белым некогерентным светом, что исключает появление спекла, а интерферограммы могут регистрироваться в проходящем свете [7].

На рис. 1 в качестве примера приведены две интерферограммы, полученные при нагружении образца из материала Д16Т с усталостной трещиной. Слева от оси трещины приведена интерферограмма, зарегистрированная в отраженном свете при восстановлении голограммы пучком света лазера, справа — в проходящем свете при восстановлении голограммы пучком белого некогерентного света. На образец был нанесен растр частотой 910 л/мм. Видно, что картины полос на интерферограммах имеют качественное различие вблизи вершины трещины, это объясняется

влиянием w . Кроме того, разрешающая способность интерферограммы, полученной в проходящем свете, существенно выше.

Таким образом, нанесение металлизированного раstra на поверхность исследуемого объекта позволяет определять u и v у вершины трещины даже при значительных перемещениях w .

Из перемещений u и v для вычисления K_I , как правило, используется v , так как оно больше u и, значит, находится с большей точностью. Для определения перемещения v голограмма восстанавливается при освещении ее по нормали, а картины полос интерференции регистрируются под углами $\pm\alpha$ к нормали (соответствующими первому дифракционному порядку) так, чтобы направление регистрации было перпендикулярно трещине. Величина перемещения определяется по формуле [5]

$$(1) \quad v = \frac{1}{2f}(N_1 - N_2),$$

где f — частота раstra; N_1 и N_2 — порядки полос интерференции в точке определения v на картинах полос, зарегистрированных с направлений $\pm\alpha$. Исходя из этого, наиболее точно будут определяться перемещения берегов трещины, так как точки измерений v на картинах полос здесь легко идентифицируются. Значение K_I вычисляется по формуле [8]

$$(2) \quad K_I = \delta \frac{E}{8} \sqrt{\frac{2\pi}{r}},$$

справедливой при плоском напряженном состоянии. Здесь δ — взаимное перемещение берегов трещины; r — расстояние от вершины трещины до точки измерения δ ; E — модуль упругости материала образца.

Практически определение K_I осуществляется следующим образом. По картинам полос интерференции строятся графики $N_i \sim r$ по берегам трещины. Затем проводится их графическое вычитание и с использованием формулы (1) строится зависимость $\delta \sim r$. По этой зависимости выбирается 10—15 значений δ в области $r < 0,05 a$ (a — полудлина трещины), где справедлива формула (2) [8]. Затем на основе метода наименьших квадратов вычисляется значение K_I .

Точность описанной выше методики определения K_I проиллюстрируем на следующих примерах. Образец в виде полосы с центральной трещиной из материала Д16Т (см. рис. 1). На одну из сторон образца нанесен растр частотой 910 л/мм. Голограммы записывались в две экспозиции при приращении напряжений на удалении от трещины $\sigma_n = 36$ МПа. По интерферограммам типа представленной на рис. 1 справа от оси образца в десяти точках при $r < 0,6$ мм определялось раскрытие трещины. График зависимости $\delta \sim r$ приведен на рис. 2: точки — экспериментально полученные значения δ , а линия — зависимость $\delta \sim r$, построенная по формуле (2) после определения K_I . Значение K_I/σ_n составило $4,38 \sqrt{\text{мм}}$. Теоретическое значение для образца данной геометрии $4,60 \sqrt{\text{мм}}$ [8]. Отличие в пределах 5 %.

Монолитная оребренная панель из материала Д16Т (рис. 3). Толщина панели 3 мм, ребер жесткости 2,5 мм. Расстояние между осями ребер $b = 48$ мм, высота ребра 22 мм. Усталостная трещина развивалась в обе стороны от отверстия диаметром 4 мм, отмеченного стрелкой на рис. 3. Экспериментально значение K_I было найдено при длине трещины $2a = 11$ мм ($a/b = 0,11$). При таком отношении a/b ребра жесткости практически не влияют на K_I [9] и его значение может быть подсчитано по формуле

$$(3) \quad K_I = \sigma_n \sqrt{\pi a}.$$

Записывались голограммы на гладкой поверхности панели с нанесенным растром частотой 800 л/мм. Наличие ребер жесткости привело к тому, что в процессе нагружения панели возникли значительные перемещения из плоскости — выпучивание области трещины. Об этом свидетельствуют эллипсоидные полосы на интерферограмме, сфотографированной в отра-

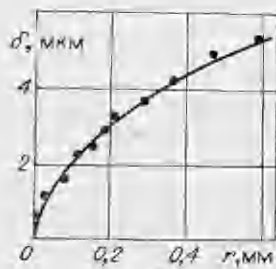


Рис. 2



Рис. 4

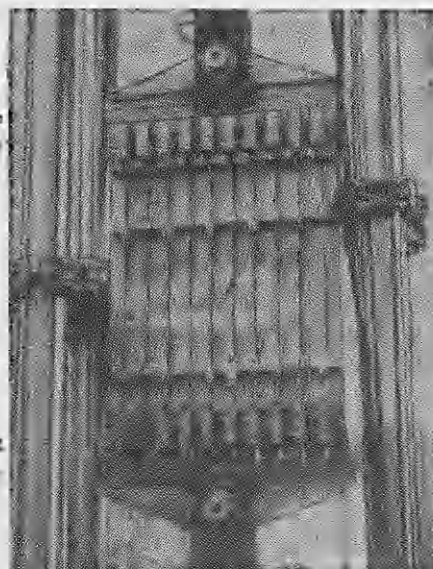


Рис. 3

женном свете при α , близком к 0, и представленной на рис. 4 слева от оси отверстия. Такие перемещения достигали 8—10 мкм. Однако это практически не повлияло на вид интерферограмм, получаемых в проходящем свете. Одна из них приведена на рис. 4 справа от оси отверстия и качественно совпадает с интерферограммой, приведенной на рис. 1. По интерферограммам определены перемещения берегов трещины и затем раскрытие трещины в 10 точках у вершины. Обработка их по формуле (2) дала значение $K_I / \sigma_H = 4,26 \sqrt{\text{мм}}$. Теоретическое значение по (3) — $4,16 \sqrt{\text{мм}}$. Здесь, как и в первом примере, отличие не превышает 5 %.

В результате можно сделать вывод, что использование накладного голографического интерферометра при нанесении на поверхность объекта высокочастотных растров позволяет определять коэффициенты интенсивности напряжений для трещин в реальных конструкциях с точностью в пределах 5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barker D. V., Sanford R. J., Chona R. Determining K and related stress-field parameters from displacement field // *Exp. Mech.*— 1985.— V. 25, N 4.
2. Kenneth M. Liecht. Moire of crack-opening interferometry in adhesive fracture mechanics // *Exp. Mech.*— 1985.— V. 25, N 3.
3. Dudderar T. D., Gorman H. J. The determination of mode I stress-intensity factors by holographic interferometry // *Exp. Mech.*— 1973.— V. 13, N 4.
4. Вест Ч. Голографическая интерферометрия.— М.: Мир, 1982.
5. Борьяняк Л. А., Герасимов С. И., Жилкин В. А. Практические способы записи и расшифровки голографических интерферограмм, обеспечивающих необходимую точность определения компонент тензора деформаций // *Автометрия.*— 1982.— № 1.
6. Post D. Moire interferometry at VPI and SU // *Exp. Mech.*— 1983.— V. 23, N 2.
7. Жилкин В. А., Зиновьев В. Б. Расшифровка интерференционных картин в методе голографического муара // *ЖТФ.*— 1986.— Т. 56, № 1.
8. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения.— М.: Металлургия, 1978.
9. Максименко В. Н., Пендровский А. В. Оценка развития усталостной трещины в оребренных панелях // *Динамика и прочность элементов авиационных конструкций.*— Новосибирск, 1987.

г. Новосибирск

Поступила 24/X 1988 г.