

07; 12

© 1992 г.

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ НА КОНТРАСТ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС В МЕТОДЕ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ

А. В. Осинцев, Ю. И. Островский, В. П. Щепинов, В. В. Яковлев

Изменение микрорельефа поверхности между экспозициями приводит к уменьшению контраста интерференционных полос в методе спекл-фотографии. Это обстоятельство используется для расширения возможностей метода спекл-фотографии. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния контактных давлений на контраст интерференционных полос в методе спекл-фотографии при контакте тел с разной шероховатостью поверхностей из различных материалов. Полученные результаты использованы для измерения контактных давлений в фрагменте болтового соединения.

Метод спекл-фотографии получил в настоящее время широкое распространение для измерения тангенциальных перемещений точек поверхности деформируемого тела [1, 2]. Высококонтрастные интерференционные полосы, например полосы Юнга, наблюдаемые при поточечном сканировании дважды экспонированной спекл-фотографии нерасширенным лазерным лучом, образуются только в тех случаях, когда спекл-структуры изображений поверхности тела являются коррелированными. В противном случае контраст полос падает вплоть до его полного исчезновения. При неизменных параметрах оптической схемы декорреляция спекл-структур изображений может быть обусловлена градиентами деформаций по площади сканирующего луча или изменениями микрорельефа поверхности тела между экспозициями. Последнее обстоятельство может быть эффективно использовано для расширения возможностей применения метода спекл-фотографии при решении различных задач технической физики и механики.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния контактных давлений на контраст интерференционных полос в методе спекл-фотографии при контакте тел с разной шероховатостью поверхностей и из различных материалов. Приводится пример использования полученных результатов для измерения контактных давлений между двумя плитами в фрагменте болтового соединения.

Известно, что при контакте тел с шероховатыми поверхностями их микрорельеф изменяется. Это явление было использовано для регистрации поверхности контакта взаимодействующих под нагрузкой тел [3]. Контур поверхности контакта в этом случае визуализировались по полной декорреляции спекл-структур, записанных на дважды экспонированной спекл-фотографии. Теперь нас будет интересовать случай частичной декорреляции спекл-структур, вызванной механическим контактом двух тел, имеющих примерно одинаковую твердость.

Методически удобно изучать влияние контактных давлений на контраст полос в методе спекл-фотографии на примере задачи о контакте торца жесткого цилиндра

дра со стальной плитой [4] . Для цилиндра диаметром $2a$ в окрестности центра пятна контакта существует область практически постоянных контактных давлений $q_0 = P/2\pi a^2$. Изменяя ступенчато величину нагрузки P , мы можем менять величину q_0 и, определяя контраст полос γ_0 (наблюдаемых либо с помощью поточечного сканирования, либо пространственной фильтрации) в центральной области отпечатка, установить связь между q_0 и γ_0 .

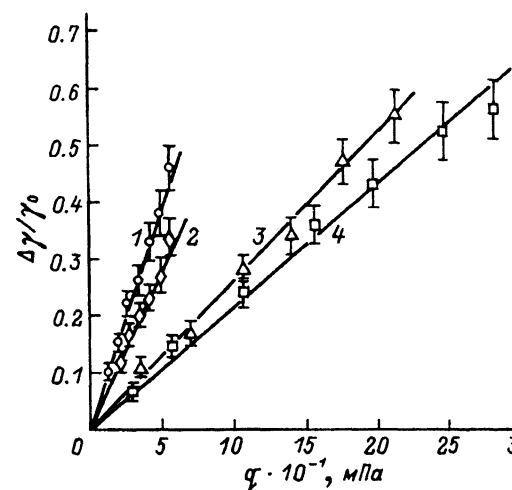


Рис. 1. Зависимости контраста полос Юнга от величины контактных давлений.

Регистрация области контакта методом спекл-фотографии производилась с использованием обычной однолучевой оптической схемы следующим образом [3] . Сначала на фотопластинке регистрировалась спекл-структура изображения исходного состояния плиты (первая экспозиция) . Затем фотопластинка смещалась в своей плоскости на величину D , производилось контактное нагружение цилиндра и плиты усилием P и после разгрузки и возврата плиты в оптическую схему регистрировалась спекл-структура изображения плиты (вторая экспозиция) .

При поточечном сканировании нерасширенным лазерным пучком в любой точке полученной дважды экспонированной спекл-фотографии на экране будет наблюдаться одна и та же картина интерференционных полос Юнга, вызванных смещением фотопластинки между экспозициями . Величину смещения D желательно выбирать таким образом, чтобы на экране наблюдалось 4—8 полос . В месте контакта микрорельеф поверхности плиты изменился, как следствие этого, контраст полос соответствующим этим точкам уменьшился .

Для получения количественных зависимостей изменения контраста полос $\Delta\gamma/\gamma_0 = (\gamma_0 - \gamma)/\gamma_0$ (γ_0 — контраст полос вне зоны контакта) от величины давлений q_0 контактное взаимодействие производилось при различных нагрузках на торец стального цилиндра диаметром 30 мм и твердостью 45 HRC, расположенного либо на стальной плите твердостью 39 HRC, либо на плите из материала Д16Т . Шероховатость торца цилиндра была $R_a = 0.32$ мкм . Шероховатость поверхности плит изменялась в диапазоне $R_a = 0.65$ —2.5 мкм . Для каждой нагрузки контактное взаимодействие осуществлялось на новом месте плиты . Контраст полос Юнга измерялся для шести интерференционных полос по линии, проходящей через центр интерферограммы ортогонально интерференционным полосам, и затем находилось среднее значение . Поточечное сканирование производилось в пяти точках центральной области постоянных контактных давлений и полученные величины контраста усреднялись . Такая обработка существенно снижает влияние спеклов на результаты измерений и повышает их точность . На рис. 1 приведены некоторые из полученных результатов для плиты из Д16Т (кривые 1 и 2) и для стальной плиты (кривые 3 и 4) . Кривая 1 получена

при шероховатости плиты $R_a = 2.5$ мкм, кривые 2 и 4 — при $R_a = 0.65$ мкм, наконец, кривая 3 — при $R_a = 1.70$ мкм. Показанные результаты свидетель-

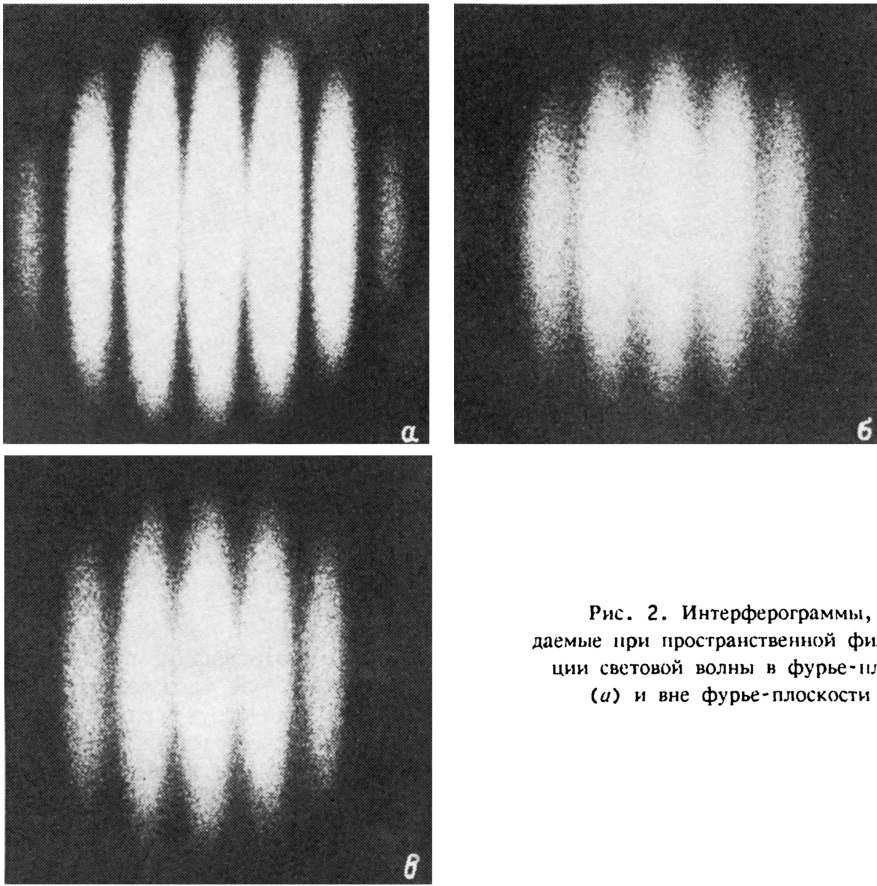


Рис. 2. Интерферограммы, наблюдаемые при пространственной фильтрации световой волны в фурье-плоскости (а) и вне фурье-плоскости (б).

ствуют о линейной зависимости между $\Delta\gamma/\gamma_0$ и q_0 в широком диапазоне изменения контраста полос. Изменение контраста полос для плиты из Д16Т наблюдается в малом диапазоне изменения давления от 10 до 70 МПа, в то время как для стальной плиты этот диапазон составляет 30—300 МПа. Это, очевидно, объясняется существенно различающейся пластичностью материалов плит. Представленные зависимости отражают также тот факт, что при меньшей шероховатости фактическая поверхность контакта больше и, следовательно, изменение микро-рельефа медленнее растет при увеличении нагрузки (кривые 2 и 4) относительно случая с большей шероховатостью (кривые 1 и 3).

Метод спекл-фотографии позволяет наблюдать также и всю поверхность контакта. Это можно осуществить, во-первых, с помощью метода вычитания изображений [5], который позволяет визуализировать области декорреляции спекл-структур изображений, записанных на дважды экспонированной спекл-фотографии, по изменению интенсивности изображения. Для этого установим спекл-фотографию в схему пространственной фильтрации. Из-за смещения фотопластинки в фокальной плоскости линзы (фурье-плоскости) будет промодулировано параллельными интерференционными полосами. Если теперь расположить в фурье-плоскости узкую щель, ось которой совмещена с центром темной полосы, то наблюдаемое через нее изображение будет темным, за исключением области контакта. Наиболее светлым областям зоны контакта будут соответствовать зоны максимальных контактных давлений, так как здесь имеет место наибольшая степень декорреляции спекл-структур. Типичная картина, соответствующая этому

случаю, показана на рис. 2, а. В центральной области изображения отпечатка серое однородное поле соответствует зоне постоянных контактных давлений q_0 . На основе использования интенсивности полученного изображения отпечатка можно определить распределение контактных давлений.

Второй способ наблюдения всей области контакта основан на использовании пространственной фильтрации вне фурье-плоскости, т.е. когда маска с небольшим круговым отверстием располагается на некотором расстоянии от фурье-плоскости [6]. Картина полос, полученная таким образом, показана на рис. 2, б. Она аналогична интерферограмме в полосах конечной ширины, полученной методом голографической интерферометрии. Определение контактных давлений по такой интерферограмме описано в работе [7]. Заметим, что обе фотографии, приведенные на рис. 2, получены с помощью одной и той же дважды экспонированной спекл-фотографии.

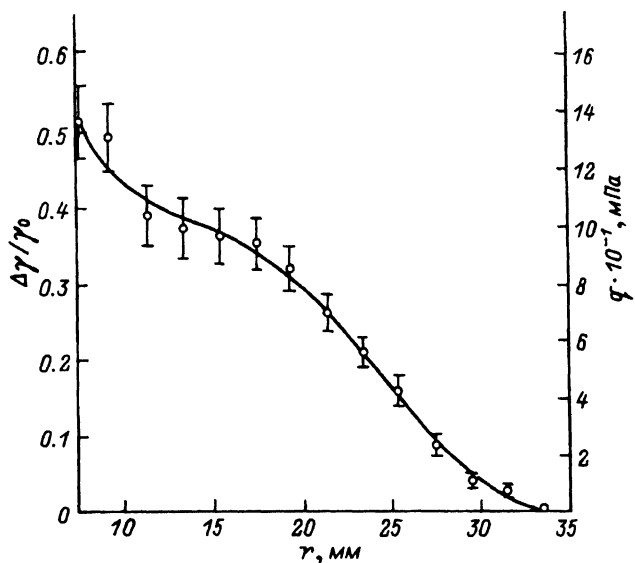


Рис. 3. Распределение контраста полос и контактных давлений в зависимости от расстояния от центра отверстия.

В заключение рассмотрим один из возможных вариантов использования полученных результатов для измерения контактных давлений. Исследовался фрагмент болтового соединения двух плит толщиной 15 мм, изготовленных из материала Д16Т. Шероховатости соприкасающихся поверхностей одинаковы, $R_a = 1.50$ мкм. Используя описанную выше методику регистрации дважды экспонированных спекл-фотографий и обработку картин полос Юнга, можно получить изменение контраста полос $\Delta\gamma/\gamma_0$ по поверхности контакта плит. На рис. 3 показано измеренное по четырем ортогональным радиусам и усредненное изменение контраста полос $\Delta\gamma/\gamma_0$ в зависимости от расстояния от центра отверстия для усилия соединения плит 180 кН.

Так как установлено, что изменение контраста полос Юнга пропорционально величине контактного давления q , то имеет место следующее уравнение: $q = C\Delta\gamma/\gamma_0$, где C — неизвестная константа, определяемая из условия равновесия.

Так как усилие P в соединении известно, то формула для определения q имеет вид [8]

$$q = P \left[\int_F (\nabla\gamma/\gamma_0) dF \right]^{-1} (\nabla\gamma/\gamma_0),$$

где F — поверхность контакта.

На рис. 3 точками показано найденное распределение контактных давлений q в области контакта плит для $P = 180$ кН. Установленная зависимость по характеру ее совпадает с аналогичной зависимостью, найденной методом фотомеханики [9]. Однако следует иметь в виду, что результаты, полученные методом спекл-фотографии, отражают более полно условия реального контакта тел.

Проведенные оценки показывают, что погрешность измерения контактных давлений не превышает 10% и определяется в основном точностью измерения контраста интерференционных полос на фоне спекл-шума. Приведенные величины погрешности относятся к методу поточечного сканирования, где обрабатываются несколько интерференционных полос для одной точки сканирования. При использовании фурье-фильтрации погрешность измерений будет выше.

Для измерения распределения контактных давлений необходимо выбирать величину нагрузки таким образом, чтобы интерференционные полосы наблюдались по всей зоне контакта. Максимальное изменение контраста не должно превышать величины, при которой наблюдается линейная зависимость изменения контраста от величины контактных давлений.

Проведенные исследования открывают новую область применения метода спекл-фотографии, основанную на использовании связи между контрастом полос и изменением микрорельефа поверхности тела. Рассмотренная методика может быть использована для измерения контактных давлений, что проиллюстрировано выше, визуализации зон износа, исследования контактно-усталостной прочности и при решении других технических задач.

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] Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
- [5] *Debrus S., Francon M., Grover C.P.* // Opt. Commun. 1971. Vol. 4. N 2. P. 172–174.
- [6] Клименко И.С., Рябухо В.П., Федулеев Б.В. // Опт. и спектр. 1983. Т. 55. Вып. 1. С. 140–147.
- [7] Осинцев А.В., Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 4. С. 202–204.
- [8] Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М.: Наука, 1988. 248 с.
- [9] Славин О.К., Тарабасов А.Н., Трумбачев А.В. // Расчеты на прочность и жесткость / Под ред. Н.Д.Тарабасова. М.: Мосстанкин, 1979. Вып. 3. С. 48–61.

Московский инженерно-физический институт
Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию

23 ноября 1989 г.

В окончательной редакции

12 декабря 1990 г.