

07

© 1991 г.

ИЗМЕНЕНИЕ КОНТРАСТА ПОЛОС В ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

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

Представлены экспериментальные зависимости изменения контраста интерференционных полос в методах голографической интерферометрии и спекл-фотографии от величины контактных давлений. Линейная зависимость между контрастом полос и контактным давлением наблюдается при контакте тел из различных материалов в широком диапазоне шероховатостей их поверхностей. Описана оптическая схема одновременной регистрации голограмм и спекл-фотографий методом двух экспозиций. Установлено, что чувствительность метода спекл-фотографии в 1.8 раз выше, чем метода голографической интерферометрии.

Изменение микрорельефа шероховатой поверхности твердого тела в общем случае вызывает локальные изменения фазы, амплитуды и поляризации световой волны, отраженной от этой поверхности, что ведет к декорреляции световых волн, и, как следствие этого, контраст полос в голографической интерферометрии и спекл-фотографии уменьшается. В соответствии с этим такие методы мы будем называть методами корреляционной голографической интерферометрии и корреляционной спекл-фотографии.

Для большинства металлических тел поляризация отраженной от шероховатой поверхности световой волны практически не меняется. При изменениях формы и размеров элементов шероховатости на небольшую величину (не превышающую нескольких длин волн) амплитуда световой волны, отраженной от большого числа элементов шероховатости, также остается неизменной. Таким образом, изменения микрорельефа поверхности наиболее сильно воздействуют на фазу световой волны.

Микрорельеф поверхности может изменяться в результате контактного взаимодействия твердых тел, коррозии, эрозии, износа, напыления и других процессов. Уменьшение контраста интерференционных полос может быть непосредственно связано с параметрами, характеризующими процессы, вызывающие изменение микрорельефа поверхности. Такая связь установлена при решении некоторых задач механики контактного взаимодействия [1-4], исследования процессов коррозии [5, 6] и кавитационной эрозии [7], обнаружения дефектов в различных элементах конструкций [8, 9]. Решение этих задач может осуществляться как методом голографической интерферометрии, так и методом спекл-фотографии. Однако вопрос о соотношении чувствительности и диапазона измерений этих методов остается открытым.

В настоящей работе приводятся результаты исследований зависимости контраста полос в голографической интерферометрии и спекл-фотографии от величины контактных давлений, полученные в рамках одного эксперимента при механическом взаимодействии тел из различных материалов и с различными шероховатостями контактирующих поверхностей.

Методически удобно изучать влияние контактных давлений на контраст полос в методах голографической интерферометрии и спекл-фотографии на при-

мере задачи о контакте торца жесткого цилиндра с плоской плитой [10]. Для кругового цилиндра диаметром $2a$ в окрестности центра пятна контакта существует область практически постоянных контактных давлений q_0 (рис. 1)

$$q_0 = P/2\pi a^2. \quad (1)$$

Изменяя величину нагрузки P , мы можем менять величину q_0 и, определяя контраст полос γ в центральной области отпечатка, установить связь между q_0 и γ .

Одновременная регистрация области контакта на поверхности плиты методами голографической интерферометрии и спекл-фотографии производилась нами с помощью оптической схемы, показанной на рис. 2. Пучок света от лазера 1 падает на делитель 2. Пршедший через делитель пучок отражается от зер-

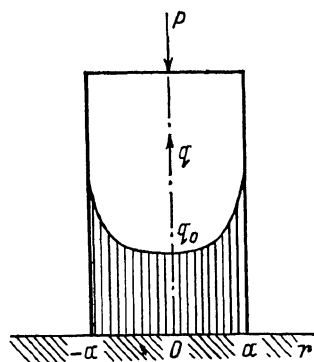


Рис. 1. Схема механического контакта цилиндра со стальной плитой и распределение контактных давлений q по диаметру пятна контакта.

кала 3, расширяется линзой 4 и с помощью зеркала 5 направляется на поверхность плиты в зоне предполагаемого контакта. Положение цилиндра на плите показано штриховой линией. Объектив 6 формирует изображение поверхности плиты в плоскости фотопластинки 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 регист-

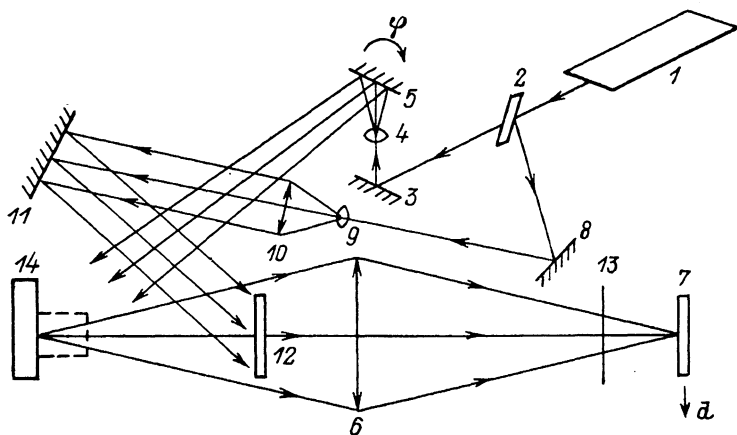


Рис. 2. Оптическая схема одновременной регистрации голограммы и спекл-фотографии.

рируется голограмма поверхности плиты. Для обеспечения раздельной записи голограммы и спекл-фотографии перед последней во время регистрации голограммы устанавливается непрозрачная маска 13.

Регистрация голограмм и спекл-фотографии методом двух экспозиций производится следующим образом. Сначала на фотопластинке 7 регистрируется исходная спекл-структура изображения плиты (1-я экспозиция спекл-фотографии). Минимальный размер спекла σ для используемого объектива, найденный с помощью формулы $\sigma = 1.22\lambda F/D$, равнялся 3.5 мкм ($\lambda = 0.63$ мкм, $F/D = 4.5$). Затем в оптическую схему устанавливается фотопластинка 12 и на ней регистрируется голограмма исходного состояния поверхности плиты (1-я экспозиция голограммы). Перед фотопластинкой 7 в это время находится непрозрачная

маска 13. Затем на плиту 14 устанавливается цилиндр и производится его нагружение силой P . После этого цилиндр удаляется, зеркало 5 поворачивается на малый угол φ и на пластинке 12 регистрируется голограмма поверхности плиты

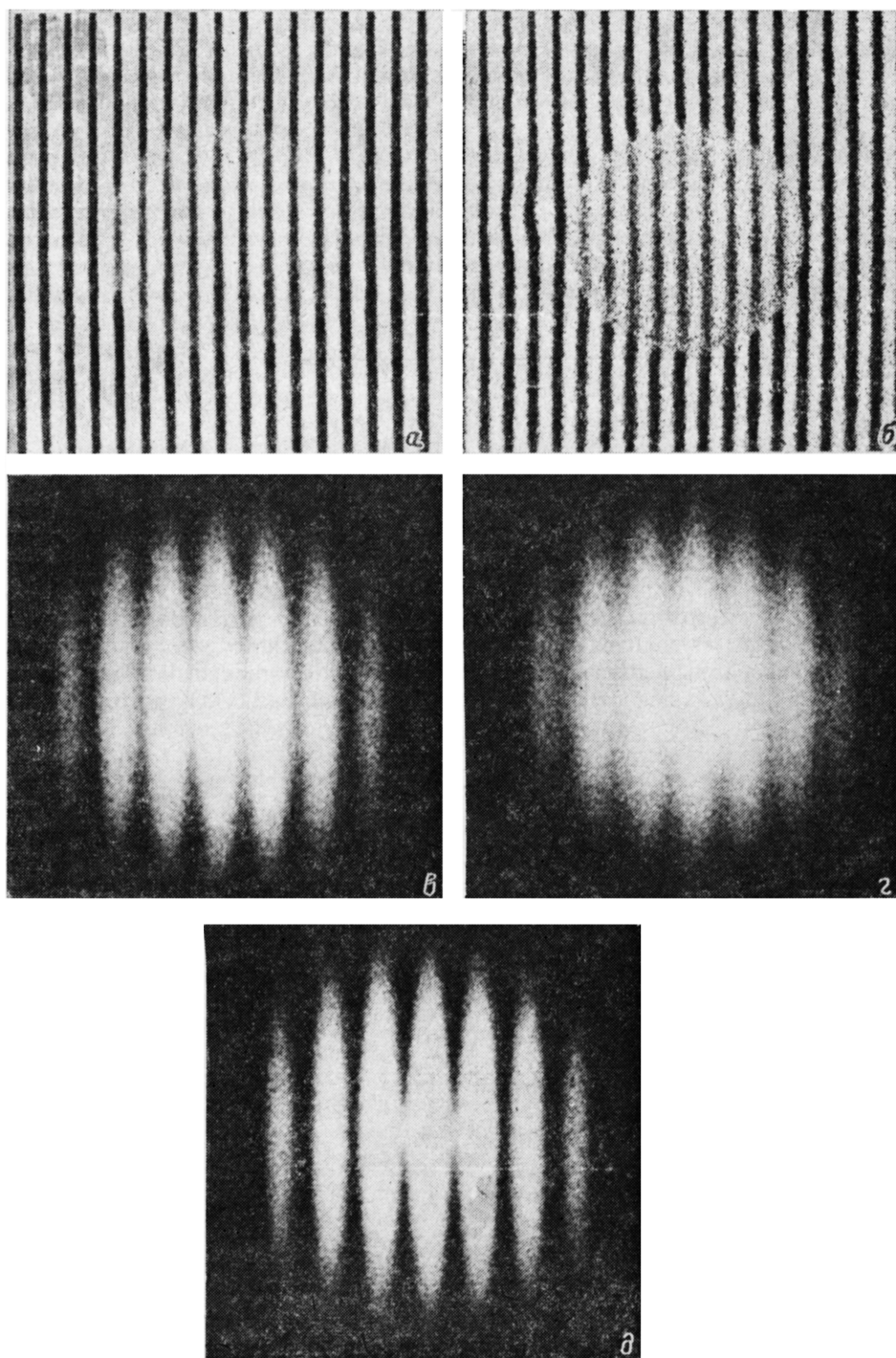


Рис. 3. Голографические интерферограммы плиты (*a*, *б*) и картины полос Юнга (*в*—*г*).

после контакта (2-я экспозиция голограммы). Затем фотопластинка 12 и маска 13 удаляются из схемы, фотопластинка 7 смещается в своей плоскости на величину d , на ней производится регистрация спекл-структуры изображения плиты

после контакта (2-я экспозиция спекл-фотографии). Таким образом, на фотопластинке *II* регистрируются две голограммы поверхности плиты до и после контакта при смещении между экспозициями источника освещения за счет поворота зеркала *Б* на угол φ , а на фотопластинке *Г* — две сдвинутые относительно друг друга на величину d спекл-структуры изображения поверхности плиты до и после контакта.

При восстановлении световых волн, записанных на голограмме, наблюдается изображение поверхности плиты, промодулированное эквидистантными интерференционными полосами, вызванными поворотом зеркала *Б* на угол φ (рис. 2). Однако в результате контактного взаимодействия микрорельеф поверхности изменяется, что приводит к декорреляции восстановленных световых волн и, следовательно, к снижению контраста полос. Поворот зеркала *Б*, эквивалентный смещению освещающего источника, также вызывает декорреляцию восстановленных волн, однако, как показано в [11], эта декорреляция относительно мала.

На рис. 3, *а* и *б* приведены две типичные голографические интерферограммы плиты в зоне контакта с торцом цилиндра при нагрузках $P_1=220$ кН и $P_2=400$ кН соответственно. Как видно в центральной части пятна контакта, контраст полос, соответствующий нагрузке P_2 , (рис. 3, *б*) меньше, чем для нагрузки P_1 (рис. 3, *а*).

При сканировании дважды экспонированной спекл-фотографии нерасширенным лазерным пучком на экране наблюдается интерференционная картина с постоянной ориентацией и частотой полос Юнга, которые задаются направлением и величиной сдвига d фотопластинки между экспозициями. Однако изменение микрорельефа поверхности плиты в зоне контакта приводит к декорреляции зарегистрированных спекл-структур. В результате этого контраст полос Юнга уменьшается. Следует отметить, что изменение направления освещения между экспозициями приводит также к декорреляции спектр-структур. Однако при используемых небольших углах поворота эта декорреляция существенно меньше, чем вызванная изменением микрорельефа. На рис. 3, *в* и *г* соответственно показаны две типичные картины полос Юнга для центральной зоны отпечатка, полученные с помощью спекл-фотографий, зарегистрированных при тех же нагрузках, что голограммы: $P_1=220$ кН и $P_2=400$ кН. Контраст полос для нагрузки P_2 ниже, чем контраст полос для нагрузки P_1 . Для сравнения на рис. 3, *д* приведена картина полос Юнга, полученная для участка плиты, находящейся вне зоны контакта.

Для определения контраста полос с помощью голограммы восстанавливалось действительное двухэкспозиционное изображение исследуемой области плиты, после чего осуществлялась запись распределения интенсивности в нем с помощью пучка волоконных световодов, торец которых был закреплен в подвижной каретке двухкоординатного потенциометра. Аналогично производилась регистрация интенсивности картины полос Юнга. В обоих случаях сканирование интерференционной картины осуществлялось по направлению, ортогональному полосам. Диаметр торца пучка световодов не превышал одной десятой периода интерференционной картины. На голографической интерферограмме контраст полос определялся по пяти полосам, проходящим через центральную область пятна контакта, и полученные данные усреднялись. Контраст полос Юнга измерялся для шести интерференционных полос в центральной зоне гало дифракции. Такие измерения производились в пяти точках центральной области постоянных контактных давлений, найденные величины контраста полос вновь усреднялись.

Эксперименты проводились при различных нагрузках на торец стального цилиндра диаметром 30 мм и твердостью 45 НРС, расположенного либо на стальной плите твердостью 39 НРС, либо на плите из алюминиевого сплава Д16Т. Торец цилиндра имел шероховатость $R_a=0.32$ мкм. Стальная плита имела на одном участке шероховатость $R_a=0.65$ мкм, а на другом — 1.70 мкм, в то время как плита из материала Д16Т — $R_a=0.65$ и 2.5 мкм. Выбранные для исследования величины шероховатостей охватывают диапазон, наиболее часто встречающийся на практике. Для каждой нагрузки контактное взаимодействие осуществлялось на новом участке плиты.

На рис. 4, а представлены результаты для случая контакта стального цилиндра со стальной плитой. Зависимости 1 и 3 получены с помощью метода спекл-фотографии для шероховатостей поверхности плиты $R_a=1.7$ и 0.65 мкм соответственно. Зависимости 2 и 4 получены с помощью метода голографической интерферометрии для тех же шероховатостей плиты. Как в методе голографической интерферометрии, так и в методе спекл-фотографии наблюдается линейная зависимость между изменением контраста интерференционных полос $\Delta\gamma/\gamma_0 = (\gamma_0 - \gamma)/\gamma_0$ (γ_0 — контраст полос вне области контакта) и величинами контактных давлений, рассчитанных по формуле (1). Сравнение зависимостей 1 и 2, а также 3 и 4, полученных для одинаковых шероховатостей различными методами, показывает, что чувствительность метода спекл-фотографии, определенная по наклону прямых на рис. 4, а, примерно в 1.8 раз выше, чем чувствитель-

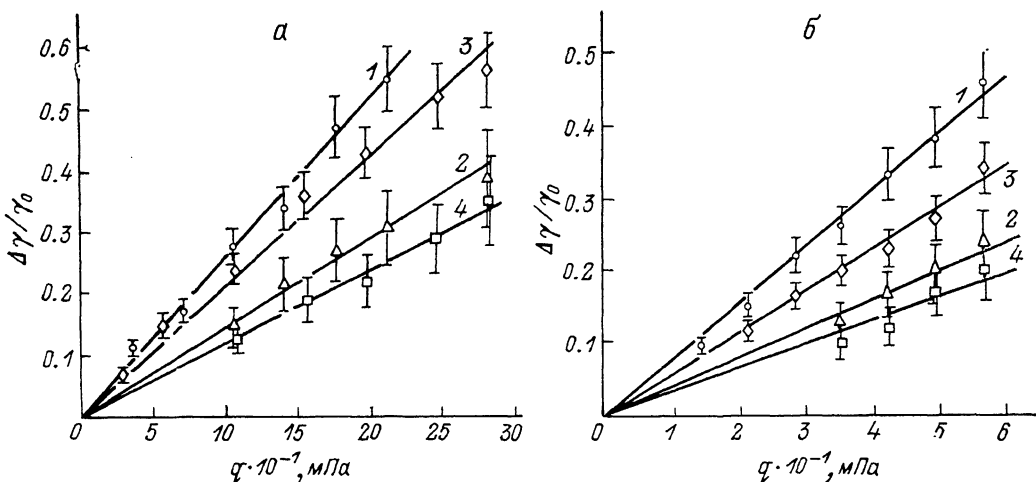


Рис. 4. Зависимости изменения контраста полос от величины контактных давлений при контакте цилиндра со стальной плитой (а) и с плитой из Д16Т (б).

ность метода голографической интерферометрии. При одном и том же контактном давлении меньшей шероховатости плиты соответствует меньшее изменение контраста как интерференционных полос, так и полос Юнга. Это хорошо видно из сравнения кривых 1 и 3, 2 и 4. Как следствие этого, при меньшей исходной шероховатости плиты обоими методами можно исследовать больший диапазон контактных давлений.

Результаты, приведенные на рис. 4, б, получены для случая контакта торца стального цилиндра с плитой из материала Д16Т. Зависимости 1 и 3 получены методом спекл-фотографии для шероховатостей плиты $R_a=2.5$ и 0.65 мкм соответственно, а зависимости 2 и 4 — методом голографической интерферометрии для тех же шероховатостей плиты. Все особенности, отмеченные для случая контакта торца цилиндра со стальной плитой, справедливы и здесь. Чувствительность метода спекл-фотографии также примерно в 1.8 раз выше, чем метода голографической интерферометрии. Однако диапазон допустимых изменений контактных давлений и соответственно нагрузок в этом случае существенно меньше, что, очевидно, связано с большим различием твердостей контактирующих тел.

Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют об эффективности использования методов корреляционной голографической интерферометрии и спекл-фотографии в экспериментальной механике контактного взаимодействия. Установлено, что чувствительность метода спекл-фотографии примерно в 1.8 раз выше, чем метода голографической интерферометрии. Диапазон контактных давлений, регистрируемых методом голографической интерферометрии, соответственно больше, чем в методе спекл-фотографии.

Список литературы

- [1] *Atkinson J. T., Lalor M. J.* // Application of Holography and Optical Data Processing / Ed. E. Marom, A. A. Frisem. Jerusalem, 1976. P. 1926—1928.
- [2] *Щепинов В. П., Морозов Б. А., Новиков С. А., Аистов В. С.* // ЖТФ. 1980. Т. 50. В. 9. С. 1926—1928.
- [3] *Осинцев А. В., Островский Ю. И., Щепинов В. П., Яковлев В. В.* // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 4. С. 202—204.
- [4] *Осинцев А. В., Островский Ю. И., Щепинов В. П., Яковлев В. В.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 7. С. 1420—1423.
- [5] *Ashton R. A., Slovin D., Gerritsen H. I.* // Appl. Opt. 1971. Vol. 10. P. 440—441.
- [6] *Петров К. Н., Пресняков Ю. П.* // Опт. и спектр. 1978. Т. 44. Вып. 2. С. 309—311.
- [7] *Дмитриев А. П., Дрейден Г. В., Осинцев А. В.* и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 3. С. 192—197.
- [8] *Кудреев В. Н., Панибратцев Ю. А., Сафронов Г. С.* и др. // Микроэлектроника. 1979. Т. 8. № 2. С. 166—171.
- [9] *Клименко И. С., Рябухо В. П.* // Опт. и спектр. 1985. Т. 59. Вып. 2. С. 398—403.
- [10] *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
- [11] *Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В.* Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1978. 339 с.

Московский

инженерно-физический институт
Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР

Поступило в Редакцию
17 января 1990 г.