

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ДИНАМИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В.А. Феропонтов, Н.В. Перфильева, С.С. Шмаков, С.М. Шандаров

*Экспериментальный метод оценки контактных смещений с помощью голографического интерферометра приведен в статье. Сравнение инженерного расчета и расчета по контактным напряжениям на примере конусного соединения проведено. Эффективность комплексного подхода к оценке прочности доказана.*

*Ключевые слова: расчет на прочность, контактные напряжения, конусное соединение, голографический метод*

Современное оборудование очень разнообразно и состоит из большого количества сопряжений. В условиях, когда резко возрастает скорость, мощность, производительность встает проблема повышения прочности и долговечности машин, а также снижение материалоемкости для повышения конкурентоспособности.

Применяемые на практике инженерные расчеты на прочность, основанные на определении номинальных и местных напряжений, уже являются недостаточными.

Вследствие перемещений в сопряжениях элементов конструкций передача давлений происходит по весьма малым площадкам. Материал вблизи такой площадки, не имея возможности свободно деформироваться, испытывает объемное напряженное состояние. Исследование контактных напряжений и перемещений необходимо для решения вопросов прочности многих ответственных соединений. К таким, так называемым, условно неподвижным соединениям относятся: резьбовые, клиновые, заклепочные, шлицевые соединения, соединения с натягом. Прочность и жесткость таких соединений во многом зависит от процессов, происходящих в контакте деталей соединений. Установлено, [4], что на долю контактной деформации приходится до 80% от общей деформации. Поэтому вопросы, связанные с контактным взаимодействием деталей, прежде всего, динамической контактной жесткостью и диссипацией энергии, являются весьма важными. Поэтому классический инженерный расчет на прочность должен дополняться расчетом контактных смещений.

Теоретический расчет в статике с учетом контактных смещений в сопряжениях уже

давно применяется на практике, однако до недавнего времени установки для практического измерения перемещений в контакте были ограничены по точности.

Проведем сравнение инженерного расчета и расчета с учетом контактных деформаций на примере конусного соединения

Инженерный расчет сопряжения

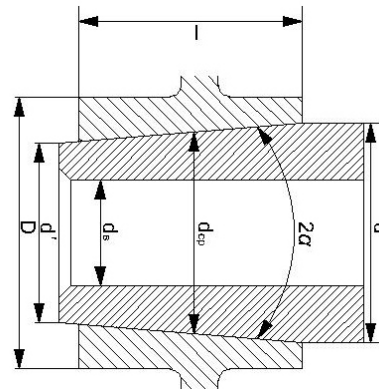


Рисунок 1 - Расчетная схема конусного соединения

Усилие затяжки определяется формулой

$$P_{zat} = 10^3 \frac{M_{kp} \cdot K}{d_{cp} \cdot f} \left( \frac{f}{tg\alpha} + 1 \right), \text{ где (1)}$$

$M_{kp}$  — крутящий момент;

$K$  — конусность;

$f$  — коэффициент трения;

$d_{cp}$  — средний диаметр;

$l$  — активная длина конуса;

$d$  — диаметр конуса.

Возникший в соединении диаметральный натяг зависит от радиальной жесткости вала и ступицы и определяется по формуле Ламе

$$\Delta = 10^3 \cdot k \cdot d_{cp} \cdot \theta, \quad \text{где} \quad (2)$$

$k$  — осевая сила, необходимая для создания давления;

$\theta$  — коэффициент, учитывающий модуль нормальной упругости, коэффициент Пуассона и тонкостенность

Необходимый осевой натяг определяется

$$h = 10^{-3} \frac{\Delta'}{K}, \quad \text{где} \quad (3)$$

$\Delta'$  — коэффициент, зависящий от диаметрального натяга и параметров микрогеометрии

С учетом контактных смещений фактический натяг определяется

$$\delta_f = \theta_{0f} \cdot d_{cp} \cdot \left( \frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right), \quad \text{где} \quad (4)$$

$\theta_{0f}$  — номинальное давление, рассчитанное с учетом контактной податливости.

Расчет показал, что при учете деформаций в контакте диаметральный и осевой натяг примерно на 30% меньше, чем при обычном инженерном расчете

Приведенная расчетная методика требует экспериментальной проверки.

Для этих целей можно применить лазерные измерительные технологии. Например, методы голографической интерферометрии. Они рассматриваются как наиболее чувствительные и пригодные для регистрации физических величин со сверхмалыми значениями. Использование методов голографии делает возможным проведение интерферометрических измерений диффузно отражающих нестационарных объектов. В частности, записав голограмму какого-либо короткоживущего объекта, впоследствии её можно исследовать, как если бы объект был статическим. Применение голографических принципов обработки информации позволяет создавать эффективные измерительные системы, с помощью которых информация об исследуемом объекте может быть получена из изменений как фазы, так и интенсивности световой волны рассеянной объектом. Схема подобной

системы, называемой адаптивным голографическим интерферометром [1], представлена на рис. 2. Свойства фоторефрактивных кристаллов [7, 8], применяемых в подобных системах как среды для регистрации голограммы, позволяют реализовать адаптивную к медленным изменениям, обусловленных дрейфом внешних условий, динамическую голографическую интерферометрию для регистрации колебаний или деформаций объекта в реальном времени.

Формирование голограммы происходит в фоторефрактивном кристалле (ФРК) титаната висмута среза (100) 7 (см. рис. 2) непосредственно при попадании на него оптического излучения. Дополнительной обработки (проявление, фиксация и т. п.) не требуется. Таким же образом (при помощи света) голограмма может быть стерта. Свет вызывает внутри кристалла перераспределение зарядов, и в течение характерного времени (времени записи) устанавливается динамическое равновесие между распределениями интенсивности записывающего света и электрического заряда.

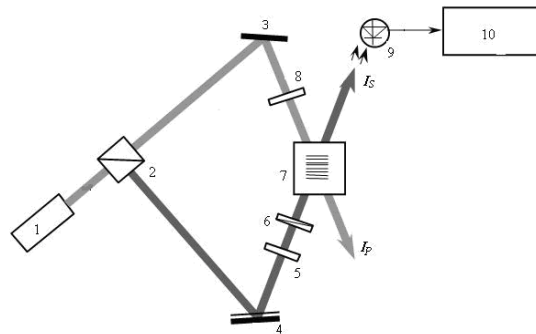


Рисунок 2. Схема адаптивного голографического интерферометра: 1 – лазер; 2 – оптический делитель; 3 – неподвижное зеркало; 4 – исследуемый объект; 5, 8 – четвертьволновые пластины; 6 – поляризатор; 7 – фоторефрактивный кристалл  $Bi_{12}TiO_{20}$  среза (100); 9 – фотоприемник; 10 – селективный вольтметр

Если параметры световых волн, формирующих голограмму, изменяются быстро (за времена, меньшие времени записи), то голограмма не успевает следовать за ними, то есть не реагирует на изменения, вызванные воздействием исследуемого объекта. Для таких изменений голограмма будет аналогом статической голограммы, что обеспечит пре-

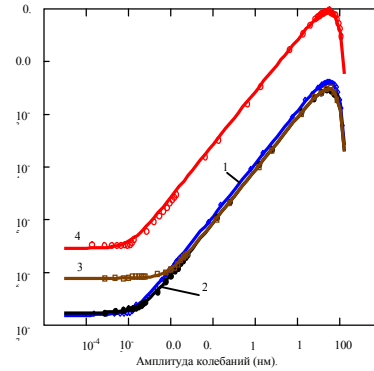
## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ДИНАМИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

образование на ней световых волн и получение информации об объекте.

Источником оптического излучения для формирования отражательной голограммы [4] может служить He-Ne-лазер 1 с длиной волны  $\lambda = 633$  нм, излучение которого делится при помощи делительного кубика 2 на два пучка: сигнальный с интенсивностью  $I_S$  и опорный с интенсивностью  $I_P$ . Отраженный от исследуемого объекта фазово-модулированный сигнальный пучок проходит через кристалл 8, где формирует со стационарным опорным пучком динамическую отражательную голограмму. Благодаря дифракции опорного пучка на голограмме, сигнальный пучок на выходе кристалла приобретает амплитудную модуляцию по интенсивности, которая фиксируется с помощью фотоприемника 9. В качестве такого фотоприемника может использоваться фотодиод ФД256, нагруженный на сопротивление  $R_i = 43$  кОм, при напряжении обратного смещения  $U_0 = 10$  В [2]. Снимаемые с сопротивления нагрузки сигналы фазовой демодуляции [1,2] на частотах первой и второй гармоник модулирующей частоты измеряются селективным вольтметром 10 при его максимальной избирательности. Использование поляризатора 6 позволяет измерять зависимости выходного сигнала на различных гармониках в спектре модуляции сигнального пучка, от ориентации его вектора поляризации на входной грани кристалла.

В работе [2], например, адаптивный голографический интерферометр (рис. 2) использовался для исследования колебаний пьезокерамического зеркала на частотах 300 Гц и 3000 Гц. Типичные зависимости напряжения на фотоприемнике 9 от амплитуды колебаний зеркала показаны символами на рис. 3.

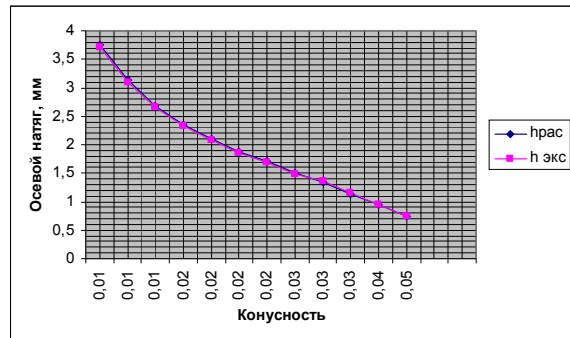
Как видно из рис. 3. адаптивный голографический интерферометр позволяет измерять колебания отражающей поверхности с амплитудами 4 и 2,5 пм на частоте 3 кГц при избирательности селективного вольтметра 25 и 40 дБ, соответственно. Минимально измеренная амплитуда колебаний зеркала 1,5 пм, была измерена на частоте 300 Гц при избирательности 40 дБ.



*Рисунок 3 - Зависимость напряжения на фотоприемнике от амплитуды колебания зеркала*

Соотношение расчетных и экспериментальных данных зависимости осевого натяга от конусности. Разница между расчетными и экспериментальными данными не превышает 1%.

K	h <sub>рас</sub> , мм	h <sub>экс</sub> мм
0,01	3,75	3,72
0,012	3,13	3,1
0,014	2,68	2,65
0,016	2,35	2,34
0,018	2,1	2,08
0,02	1,88	1,85
0,022	1,71	1,69
0,025	1,5	1,48
0,028	1,34	1,37
0,033	1,14	1,15
0,04	0,94	0,95
0,05	0,75	0,75



*Рисунок 4. Соотношение теоретических и экспериментальных данных исследования зависимости осевого натяга от конусности*

## ВЫВОД

На сегодняшний день экспериментальные методы исследования деформаций в контакте применяются лишь в единичных случаях. Одним из таких методов является метод голографической интерферометрии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаптивная интерферометрия, использующая динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах / А.А. Колегов, С.М. Шандаров, Г.В. Симонова и др. // Квантовая электроника. – 2011. – т. 41. – №9. – С. 847-852.
2. Исследование амплитудных характеристик голографического интерферометра / С.С. Шмаков, А.С. Котин, С.М. Шандаров, Н.И. Буримов // Южно-сибирский научный вестник. – 2012. – №1. – С. 198–200.

3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.

4. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 265 с.

**Феропонтов В.А.**, старший преподаватель кафедры «Механика и инноватика», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, [sopromat116@mail.ru](mailto:sopromat116@mail.ru)

**Перфильева Н.В.**, д.т.н., профессор кафедры «Механика и инноватика», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, [sopromat116@mail.ru](mailto:sopromat116@mail.ru)

**Шандаров С.М.**, д.ф.-м.н., профессор, ТУСУР, заведующий кафедрой ЭП

**Шмаков С.С.** старший преподаватель, ТУСУР, кафедра ЭП