

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

- 1. Голографическая интерферометрия**
- 2. Электронная спекл-интерферометрия**

1. Голографическая интерферометрия

Интерференция наблюдается при сложении двух волн, когда при условии их когерентности, т.е. постоянной разности фаз этих волн, возникает характерное пространственное распределение интенсивности света — интерференционная картина. Фотопластинка-детектор регистрирует это в виде чередующихся светлых и темных полос, или интерферограммы.

Для определения остаточных напряжений применялась и обычная интерферометрия, но эту работу можно было провести только в хорошо оборудованной лаборатории: требовалась специальная подготовка поверхности исследуемого объекта, придание ей правильной формы, специальное освещение и оборудование.

Когда создали лазер, т.е. источник излучения с высокой пространственной и временной когерентностью, стала развиваться оптическая голография — способ записи и восстановления световых волн, рассеянных объектом и несущих информацию о его форме (т.е. трехмерного образа объекта). Некоторые методики интерферометрии сильно упростились, так как снялись проблемы освещения и подготовки поверхности.

Принципиальная оптическая схема для записи голограммы по Лейту—Упатниексу [5] показана на рис.1. Луч лазера (1) расширяется линзой (2) и делится полупрозрачным зеркалом (3) на две части. Одна часть — это опорный луч (ОЛ) — проходит через зеркало и сразу падает на фотопластинку-детектор (5). Вторая часть, отраженная от зеркала, освещает объект (4) и, диффузно рассеянная им, проходит через линзу (6) и тоже падает на детектор. Это предметный луч (ПЛ).

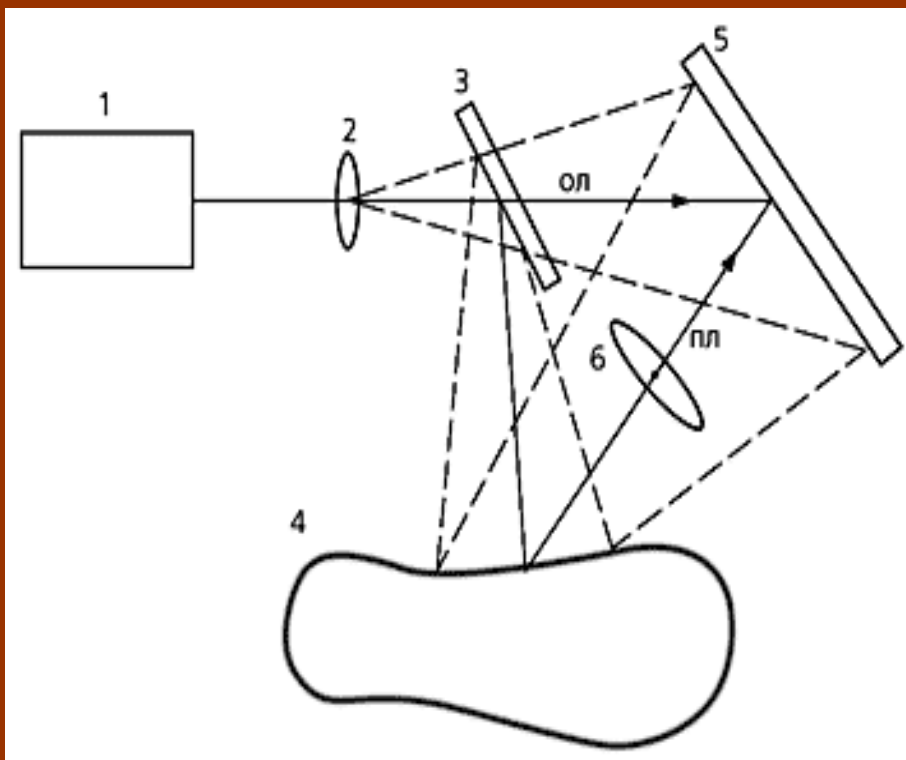


Рис.1. Принципиальная схема записи голограммы Лейта—Упатниекса: 1 — лазер, 2 — линза, 3 — полупрозрачное зеркало, 4 — объект, 5 — фотопластинка-детектор, 6 — линза в режиме лупы, ОЛ — опорный луч, ПЛ — предметный луч.

Заметим, что наличие линзы (б) не принципиально для записи голограмм, однако необходимо для измерения остаточных напряжений. Линза находится на фокусном расстоянии от объекта и поэтому работает в режиме лупы: на фотопластинке записывается не весь образ объекта, а малая, но увеличенная в 2—5 раз, его часть — область поверхности с отверстием. Это помогает рассмотреть довольно плотно расположенные (особенно на кромке отверстия) полосы интерферограммы.

С развитием голографии возникла голографическая интерферометрия, выполняемая гораздо проще, чем обычная, с меньшими затратами и ограничениями. Ее сущность такова: если совместить две голограммы объекта, записанные в различное время при разных состояниях поверхности объекта (один из способов — записать на одну фотопластинку), то при освещении этой фотопластинки лазерным лучом возникает результирующая интерферограмма, отражающая разницу геометрических состояний объекта. Линии интерферограммы показывают как перемещения целого объекта, так и деформацию его поверхности. Общие и локальные перемещения обычно хорошо разделяются.

Голография позволила исследовать объекты с любым, самым замысловатым рельефом. Подготовка поверхности стала минимальной. Главное — ее микрорельеф не должен измениться за время исследования. Другими словами: очистить, промыть и не загрязнить — требования на бытовом уровне.

Осталось несколько важных условий: интерферометрическую установку надо прочно крепить на объекте (или объект на установке), а одна из ее измерительных частей должна сниматься, чтобы не мешать сверлению, и надежно возвращаться на прежнее место. Для такого возврата существуют относительно простые методы, например: на одной части разъема по окружности расположены три стальных шарика с расстоянием по дуге 120° , а на ответной стальной части — три радиальных шлифованных паза под тем же углом. Такое устройство обеспечивает съем и возврат снимаемой части в прежнее положение с точностью до 0.1 мкм. Оно хорошо работало в стационарной лабораторной измерительной установке. В дальнейшем были разработаны оптические схемы, позволявшие исключить движущиеся части. Эти схемы были заложены в основу переносных приборов.

Сущность способа определения остаточных напряжений методом зондирующей лунки в сочетании с голографической интерферометрией заключается в следующем. Во время первой экспозиции записывается голограмма окрестности будущей лунки на поверхности объекта в исходном состоянии. Потом создается возмущение поверхности тела (например, путем высверливания или травления малой лунки), что позволяет проявиться остаточным напряжениям: изъятие малого объема приводит к локальным упругим перемещениям, пропорциональным остаточным напряжениям.

Далее записывается голограмма возмущенной таким образом поверхности тела. В результате наложения голограмм при их одновременном восстановлении упругие перемещения поверхности в окрестности лунки выявляются в виде интерферограммы.

Она наглядна и проста для расшифровки: в случае регистрации нормальной компоненты перемещений (перпендикулярной к исходной поверхности тела), полосы интерферограммы являются линиями уровня, т.е. равных перемещений, отличающихся по высоте на половину длины волны лазерного излучения $\lambda/2 \sim 0.3 \text{ мкм}$ (рис.2).



Рис. 2. Интерферометрические линии уровня упругих перемещений поверхности тела с остаточными напряжениями в окрестности зондирующей лунки.

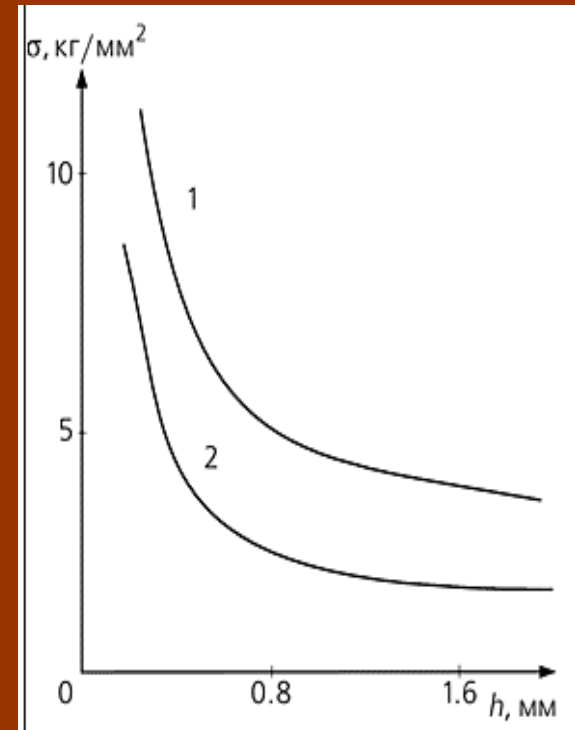


Рис. 3. Графики цены полосы (напряжение σ в зависимости от глубины зондирующей лунки h): 1 — при измерениях только по черным полосам; 2 — при измерениях как по черным, так и по белым полосам.

Оси симметрии интерференционной картины совпадают с направлениями экстремальных (главных) растягивающих и сжимающих остаточных напряжений. Величина напряжений пропорциональна числу интерференционных полос, причем цена полосы зависит от упругих свойств материала и от диаметра и глубины лунки и определяется по графикам (рис.3), рассчитанным на основании решения трехмерной задачи теории упругости.

Объем необходимых вычислений для получения значений напряжений очень мал, и они могут быть выполнены оператором сразу же при получении и наблюдении интерференционной картины. При этом, в отличие от тензометрирования, где измерения выполняются для отдельных точек, данный метод регистрирует линии уровня перемещений по всей области поверхности тела в окрестности зондирующей лунки, что позволяет визуально определять направления главных напряжений и делать качественные выводы о свойствах напряжений еще до подсчета числовых значений соответствующих величин.

Тем самым были созданы основы метода для массовой лабораторной работы по измерению остаточных напряжений. Начались исследования остаточных напряжений в сварных соединениях и отработка режимов сварки стали, алюминия, титана, магния. Вначале работа велась с образцами на лабораторном стенде.

Новая методика оказалась эффективной при отработке технологии электронно-лучевой сварки и локальной термической обработки образцов разного сечения (плоских, тавровых, цилиндрических, сферических) из высокопрочных сталей разных марок и титановых сплавов.

По мере накопления опыта был сделан следующий важный шаг — создан переносной прибор, который работал не только в лаборатории, но и в цеху и на открытом воздухе. С этим прибором в заводских условиях выполнена комплексная программа по отработке режимов сварки и локальной термической обработки титановых крупногабаритных сосудов высокого давления объемом 1000 л, рассчитанных на рабочее давление 300 атм. Разработка новой технологии шла при непрерывном контроле остаточных напряжений. В итоге технология изготовления сосудов была значительно изменена, удешевлена, а качество изделия повышено. Это исследование проводилось в цехах Авиационного научно-технического комплекса им. А.Н. Туполева. С этим же прибором были сделаны первые выезды на строящуюся Курскую АЭС и Астраханский газоперерабатывающий завод, где измерялись сварочные напряжения в реальных конструкциях в трудных климатических условиях. В сотрудничестве с Конструкторским бюро им. С.А. Лавочкина была усовершенствована технология сварки и режимов термической обработки сварных соединений ряда алюминиевых сплавов, а также выполнена экспертная работа по установлению причин саморазрушения корпуса одного из космических аппаратов во время хранения.

На основе проведенных исследований создано несколько видов портативных голографических систем для измерения напряжений под общим названием ЛИМОН — лазерно-интерферометрический метод определения напряжений, и с помощью этих систем выполнена программа по отработке режимов сварки и локальной термической обработки титановых крупногабаритных сосудов высокого давления объемом 1000 л, рассчитанных на рабочее давление 300 атм. Разработка новой технологии шла при непрерывном контроле остаточных напряжений. В итоге технология изготовления сосудов была значительно изменена, удешевлена, а качество изделия повышено. Это исследование проводилось в цехах Авиационного научно-технического комплекса им. А.Н. Туполева. С этим же прибором были сделаны первые выезды на строящуюся Курскую АЭС и Астраханский газоперерабатывающий завод, где измерялись сварочные напряжения в реальных конструкциях в трудных климатических условиях. В сотрудничестве с Конструкторским бюро им. С.А. Лавочкина была усовершенствована технология сварки и режимов термической обработки сварных соединений ряда алюминиевых сплавов, а также выполнена экспертная работа по установлению причин саморазрушения корпуса одного из космических аппаратов во время хранения.

На основе проведенных исследований создано несколько видов портативных голографических систем для измерения напряжений под общим названием ЛИМОН — лазерно-интерферометрический метод определения напряжений.

2. Электронная спекл-интерферометрия

Голографический метод оказался удобным, надежным, эффективным, быстрым и интересным в работе. Но процесс записи и обработки голограмм довольно сложен и трудоемок: низкая чувствительность фотоматериалов требует экспозиций порядка секунд, мокрая обработка фотопластинок или обслуживание оборудования термопластической записи и визуальное считывание интерферограмм нуждается в специальных навыках операторов. Следует хранить большие массивы информации на фотопластинках или делать с голограмм фотографии.

Современная видео- и вычислительная техника помогла решить некоторые задачи получения, хранения, считывания и обработки голографических интерферограмм, но она же представила и другую возможность. Как появление лазера изменило положение в экспериментальной оптике, так и компактная компьютерная техника вызвала второе большое изменение: фотографический детектор был заменен цифровой видеосистемой с регистрацией в ЭВМ оцифрованной видеоинформации о разных, практически неограниченных по количеству экспозициях процесса измерения перемещений и дальнейшей обработкой этой информации.

Этот компьютерный метод, называемый электронной спекл-интерферометрией, во многом совпадает с голографической интерферометрией: использование лазера, близкие оптические схемы и по существу те же результаты измерений в виде интерферограмм.

Разница состоит в том, что голография фиксирует полную информацию о геометрии тела, в том числе и объем, а спекл-интерферометрия использует электронную фотографию особо тонкой, «зернистой» структуры света, отраженного диффузным объектом при лазерном освещении, — поле спеклов (англ.: spark — искра, вспышка, проблеск; sparkle — сверкать, искриться). Глаза наблюдателя отмечают это в виде чарующего мерцания, искорок на участке, освещенном лазером. Детектор — фотопластинка, видеокамера — фиксирует спекл в виде зернистой структуры на изображении. Для голографии спекл является шумом, ухудшающим изображение, но в спекл-интерферометрии это носитель информации, так как спекл-структура зависит от формы поверхности и хорошо отражает ее изменения.

Запись и сопоставление двух спекл-структур, легко проводимые на ЭВМ в цифровой форме, выявляют изменения в положении или геометрии тела в виде такой же системы линий, как и в голографии, т.е. интерферограммы, причем с той же чувствительностью. Уменьшение информативности спекл-интерферограммы по сравнению с голографической за счет замены объемной картины на плоскую в рассматриваемом случае несущественно, а методически неоднородный процесс голографической интерферометрии заменяется единым, технологически связанным циклом с более широкими возможностями автоматизации.

Важной особенностью электронной спекл-интерферометрии является то, что можно записать практически неограниченное количество экспозиций и затем брать их произвольные комбинации.

Каждое сочетание будет отражать сдвиг объекта между экспозициями. Можно сравнивать кадры не только статического состояния, но также кадры, сделанные во время движения объекта; необходимо только подобрать время экспозиции и время между экспозициями. Соответственно последовательность сочетаний экспозиций покажет движение объекта с субмикронной точностью.

С использованием электронной спекл-интерферометрии была создана система нового поколения для измерения напряжений в упругих телах и конструкциях — ЛИМОН-ТВ, в которой объединены идеи и методы голографической интерферометрии, разработанные ранее для анализа остаточных напряжений, с преимуществами современной компьютерной техники. Кроме исследования напряжений эта система позволяет решать и другие задачи: о местах приложения и величинах нагрузок, действующих на упругое тело, о напряжениях в тонких пленках и связях их механических характеристик с напряжениями, о распределенных и локальных неоднородностях структуры тела, о микротрещинах и внутренних расслоениях, об отслоениях покрытий и деформационных предпосылках их возникновения и т.д. Измерения проводятся практически в режиме реального времени.

Переносная малогабаритная измерительная система изготавливается из доступных комплектующих. В ее состав входят блок интерферометра и компьютерный блок.

Блок интерферометра (вес для различных вариантов компоновки около 2 кг) состоит из опорно-юстировочной конструкции и корпуса, в котором монтируется полупроводниковый лазер с длиной волны 640 нм и мощностью излучения 10 мВт, техническая видеокамера с высокой чувствительностью (0.1 люкс) и разрешением 600 телевизионных линий и другие элементы оптической схемы: направляющие зеркала, коллиматор, полупрозрачное делительное зеркало и диффузно рассеивающая пластина, формирующие опорный и предметный световые пучки. Компьютерный блок в мобильном варианте состоит из переносной ЭВМ, имеющей видеовход для подключения обычной видеокамеры. При отсутствии видеовхода в качестве аналого-цифрового преобразователя может быть использовано внешнее устройство типа Cap View, подсоединяемое к ЭВМ через USB-порт. На рис.4 показаны общий вид компьютерного интерферометра ЛИМОН-ТВ (а) и один из вариантов компоновки оптической схемы.

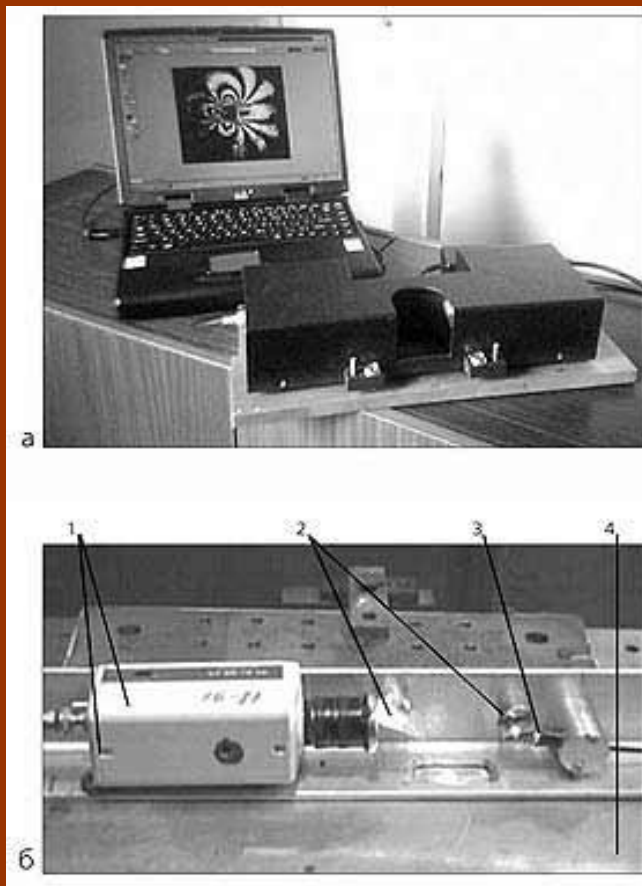


Рис. 4. Компьютерный интерферометр ЛИМОН-ТВ:

а — общий вид;

б — оптическая схема:

1 — видеокамера,

2 — система деления лучей из двух полупрозрачных зеркал и матового стекла,

3 — полупроводниковый лазер,

4 — объект измерений.



Рис. 5. Создание интерференционной картины: а, б — изображения исследуемого участка поверхности объекта до и после высверливания зондирующей лунки, в — интерференционная картина, полученная поточечным вычитанием яркостей изображения а из б.