

Министерство образования РФ  
Пермский государственный технический университет  
Кафедра Динамики и прочности машин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ  
МЕТОДА ХРУПКИХ ПОКРЫТИЙ**

Пермь 2002

УДК 678.53

ББК: 22.251 я 73

Составил: Сурсяков В.А., к.т.н., ст.н.с.

Рецензент: к.ф.м.н., доцент Лежнева А.А.

Сурсяков В.А. Исследование деформаций с помощью метода хрупких покрытий: Методическая разработка. - Пермский государственный технический университет. - Пермь, 2002. – 12 с.

Приведено краткое описание наиболее важных аспектов метода тензо-чувствительных хрупких покрытий: условий образования трещин, коэффициента чувствительности, материалов, применяемых в качестве хрупкого покрытия, задач, решаемых с помощью данного метода. Излагается порядок проведения лабораторных работ по определению коэффициента чувствительности покрытия и исследованию деформаций на образцах с концентраторами.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ХРУПКИХ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Метод хрупких тензочувствительных покрытий является перспективным и широко применяемым способом экспериментальных исследований полей деформаций и напряжений на поверхности деталей, узлов конструкций или их моделей при приложении к ним статической или динамической нагрузки. Этот метод заключается в наблюдении трещин, образующихся при нагрузке или разгрузке детали, в тонком слое хрупкого покрытия, предварительно нанесенного на исследуемую поверхность. Тонкое покрытие прочно связано с поверхностью образца или детали, поэтому деформации в точках покрытия и в связанных с ними точках поверхности исследуемого объекта, одинаковые. Трещина в покрытии вызывается растягивающими напряжениями или деформациями. Высокая хрупкость покрытия (образование в нем трещин при малой деформации) связана с наличием в нем до приложения внешней нагрузки к детали остаточных напряжений (двухосное равномерное растяжение). Измерения проводят путем визуального наблюдения образования и распространения трещин в покрытии при нагружении исследуемых объектов и их фотографирования. По мере увеличения нагрузки трещины распространяются от более напряженного к менее напряженному месту; при снятии нагрузки полученные в хрупком покрытии трещины остаются видимыми. Хрупкие покрытия позволяют при плавном или ступенчатом нагружении (разгрузке) исследуемой конструкции находить в нагруженных зонах свободной поверхности, включая места концентрации напряжений, главные деформации и напряжения с погрешностью в пределах 15%, не применяя другие методы исследования. Измерение полей упругопластических деформаций проводят на отдельных участках нагрузки с возможностью оценки напряжений с использованием диаграмм деформирования материала исследуемой детали. Для измерения динамических деформаций выполняют соответствующую градуировку покрытия по тензочувствительности в зависимо-

сти от скорости изменения деформаций во времени. Хрупкие покрытия могут также использоваться для индикации повреждений в конструкции в рабочих условиях. Метод особенно эффективен при испытаниях деталей и конструкций с большой неравномерностью поля напряжений на их поверхности.

Основные положения, подтверждаемые экспериментально и применяемые при рассмотрении работы хрупкого покрытия, следующие [1]:

- между покрытием и поверхностью образца или детали, на которые нанесено покрытие, имеет место полная адгезия;
- толщина слоя хрупкого покрытия и его жесткость пренебрежимо малы по сравнению с жесткостью исследуемого объекта;
- напряженное состояние в покрытии на расстоянии, большем пятикратной толщины слоя покрытия от его края, является плоским с равномерным распределением напряжений по толщине покрытия, а третья компонента главных напряжений в покрытии (и в точках поверхности детали), нормальная к поверхности хрупкого слоя, равна нулю;
- материал покрытия является изотропным, и применимо линейное наложение деформаций (напряжений) для получения критического состояния, соответствующего образованию трещины в покрытии.

## 2. ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ХРУПКОГО ПОКРЫТИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ В НЕМ ТРЕЩИН

Тензочувствительность  $\epsilon_c$ , определяют как относительное удлинение (наибольшая главная деформация) на поверхности градуированного образца с известным линейным напряженным состоянием, при котором возникает трещина в покрытии.

Существующие типы хрупких покрытий обладают чувствительностью  $\epsilon_c$ , порядка  $(2 \div 20) \cdot 10^{-4}$ . Первые трещины в покрытии на стальных деталях появляются при напряжении  $(20 \div 40)$  Мпа. Тензочувствительность покрытия увеличивается с ростом толщины. Чтобы уменьшить разброс чувствительности, необхо-

димо наносить на деталь покрытие равномерной толщины. Эксперименты показывают, что наиболее приемлемая толщина покрытия  $(0,1 \div 0,13)$  мм для получения с стабильной чувствительности.

В соответствии с условиями образования трещин геометрическое место их концов представляет собой линию, в точках которой относительное удлинение (деформация) равно чувствительности хрупкого покрытия  $\epsilon_s$ . Линия, проходящая через концы трещин при данном значении внешней нагрузки, называется *изоэнтатой*. Если построить такие линии для нескольких значений внешней нагрузки, то с помощью полученной картины изоэнтат можно определить НДС в области картины трещин и при нагрузках, превышающих значение, соответствующее появлению первых трещин. При приложении нагрузки к детали с нанесенным хрупким покрытием в точках поверхности детали и в соответствующих точках покрытия возникают деформации, одинаковые по величине и направлению. Для упругих деформаций, используя закон Гука, в результате несложных преобразований получаем:

$$\epsilon_s = (1 - \mu_n^2) \sigma_n / [E_n (1 - \mu \cdot \mu_n)] \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_n$  - напряжения, возникающие в материале покрытия;

$E_n, \mu_n$  - модуль упругости и коэффициент Пуассона хрупкого покрытия;

$\mu$  - коэффициент Пуассона образца или детали.

Соотношение (1) показывает, что при принятом критерии прочности покрытия (критерий максимальных растягивающих напряжений), величина  $\epsilon_s$  зависит также от величины коэффициента Пуассона  $\mu$  материала тарировочного образца. Однако из приведенной зависимости следует, что при стабильных условиях тарировки наибольшее различие в величинах  $\epsilon_s$  при изменении  $\mu$  от 0,25 до 0,35 составляет около 5%. Это значительно меньше обычного разброса значений тензочувствительности применяемых покрытий, поэтому тарировка

хрупких покрытий может производиться на образцах из другого материала, чем исследуемая деталь.

При одноосном напряженном состоянии напряжение  $\sigma$  в образце на линии конца трещины определяется по формуле:

$$\sigma = E \cdot \epsilon_s,$$

где  $E$  – модуль упругости материала образца.

### 3. ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ХРУПКИХ ПОКРЫТИЙ

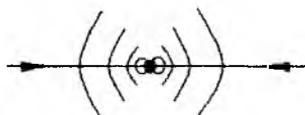
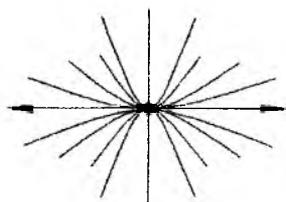
Метод хрупких покрытий позволяет решать следующие задачи:

- выявление зон, имеющих наибольшие деформации (напряжения) и малонагруженных зон;
- определение направлений главных деформаций (напряжений);
- проведение качественного анализа напряжений, возникающих в образце или детали.

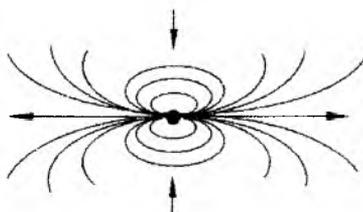
Трещины в покрытии, появляющиеся первыми в процессе нагружения, указывают наиболее напряженные зоны на поверхности образца. Расположение и форма трещин позволяют определить направление наибольшего удлинения, перпендикулярное к линии распространения трещины. Метод хрупких покрытий дает возможность сделать вывод о характере распределения напряжений в образцах и деталях. Кроме того, он может быть использован для качественной характеристики остаточных напряжений. Для этого на поверхность наносится хрупкое покрытие высокой чувствительности ( $\epsilon_s \cong 5 \cdot 10^{-4}$ ), и в исследуемых зонах сверлятся лунки диаметром 3 мм и глубиной 2 – 3 мм, обеспечивающие частичное устранение остаточных напряжений. Затем на поверхность наносят слой красного травителя. После удаления травителя в окрестности лунок в хрупком покрытии появляются трещины. В зависимости от характера снятых напряжений получается та или иная характерная картина трещин.

Одноосное растяжение

Одноосное сжатие



Сдвиг



Исследование деформаций с помощью хрупких покрытий дает наглядное представление о распределении напряжений в нагруженном образце или детали и позволяет выяснить наиболее напряженные места. Наличие качественного заключения значительно облегчает задачу количественного исследования напряженного состояния.

#### 4. ВИДЫ ХРУПКИХ ПОКРЫТИЙ

В качестве основного материала для хрупких тензочувствительных покрытий чаще всего используется сосновая подсадовая канифоль. Как хрупкое покрытие, канифоль может быть использована в чистом виде, либо с введением различных добавок, улучшающих свойства покрытия. Так были созданы по-

крытия из канифоли, обработанной окисью цинка или окисью бария, растворенной в сероуглероде. К этому типу относятся покрытие "стресскот" и покрытие ИМАШ, разработанные в Институте машиноведения. Эти покрытия обладают стабильностью по тензочувствительности, однако огнеопасность и токсичность их существенно затрудняют применение покрытий на сероуглероде. Покрытия канифольного типа, наносимые газопламенным напылением, свободны от этих недостатков, но имеют ограничения по климатическим условиям испытаний (температура от  $+5$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ ), и малым колебаниям температуры ( $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) и влажности. Для измерений при температурах от  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$  и в присутствии влаги используют оксидные наклеиваемые покрытия. Эмалевые покрытия, оплаваемые на детали, применяют для исследования изделий из термочувствительных сталей при высоких температурах (до  $+400^{\circ}\text{C}$ ).

Новый тип тензочувствительного покрытия "тенз - лак" (фирма "Вишней", США), в аэрозольной упаковке позволяет проводить измерения при температурах от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , имеет примерно те же характеристики тензочувствительности, что и покрытие "стресскот", но не является токсичным и огнеопасным.

#### *Область применения хрупких покрытий:*

1. По скорости деформации – статическое и динамическое нагружение, включая удар;
2. По объектам – на моделях и натуральных экспонатах любых размеров и конфигурации;
3. По диапазону деформаций – для упругих деформаций от 0,03% до 0,3% и больше.

#### *Достоинства метода:*

1. Простота и доступность, возможность одним покрытием исследовать всю поверхность объекта;

2. Надежность и быстрота установления наиболее напряженных мест и общего характера распределения напряжений;
3. Наглядность получаемых результатов.

#### ***Недостатки метода:***

1. Низкая точность при количественных определениях деформаций и напряжений;
2. Ползучесть покрытия и большая чувствительность к атмосферным условиям;
3. Возможность самопроизвольного растрескивания при резком изменении температуры.

***Рекомендуется*** в сочетании с методами тензометрирования.

#### **Экспериментальные исследования**

Целью выполнения лабораторных работ №1, 2 является определение коэффициента тензочувствительности хрупкого покрытия на основе канифоли и исследование напряженно – деформированного состояния (НДС) плоского стального образца с концентратором при одноосном растяжении.

#### **Работа № 1.**

##### *Определение коэффициента чувствительности хрупкого покрытия.*

Чувствительность хрупкого покрытия определяется с помощью тарировочных устройств. Простейшее из них представляет из себя образец в виде консольной балки, изготовленный из стали с высоким пределом упругости (рис. 1). Нагружающее устройство состоит из площадки с грузами, с помощью которых на конце балки задается определенный прогиб, величина его измеряется тензометром часового типа.

Схема тарировочного устройства.

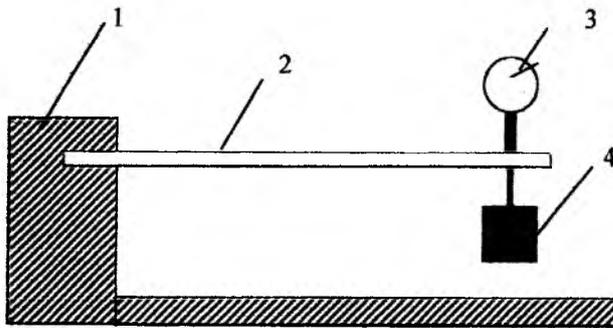


Рис. 1.

1. Основание.
2. Консольная балка с нанесенным хрупким покрытием.
3. Индикатор часового типа.
4. Нагружающее устройство.

Схема балки с трещинами.

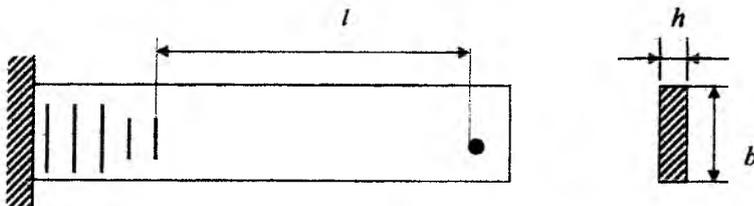


Рис. 2

**Порядок выполнения работы:**

1. Измерить ширину ( $b$ ) и толщину ( $h$ ) балки;
2. Тщательно обезжирить рабочую поверхность балки;
3. Нанести хрупкое покрытие на тарировочную балку;
4. Охладить образец до комнатной температуры;
5. Закрепить балку в устройстве (аккуратно и осторожно, чтобы не создать трещин в покрытии);
6. Настроить нагружающее устройство;
7. Нагрузить балку, фиксируя нагрузку  $P$  и появление нескольких трещин в покрытии;
8. Измерить расстояние ( $l$ ) от точки приложения нагрузки до ближайшей к ней трещины;
9. Определить коэффициент чувствительности хрупкого покрытия  $\epsilon_s$  по формуле:

$$\epsilon_s = \frac{6 P \cdot l}{b \cdot h^2 \cdot E}$$

Модуль упругости материала образца  $E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$

**Работа № 2.**

Исследование НДС стального образца с концентратором с помощью хрупкого покрытия

**Порядок выполнения работы:**

1. Тщательно обезжирить рабочую поверхность образца;
2. Нанести хрупкое покрытие на исследуемый образец;
3. Охладить образец до комнатной температуры;

4. Установить образец в захваты испытательной машины УМ-10 и произвести нагружение до появления первых трещин в хрупком покрытии;
5. Зафиксировать нагрузку по силоизмерителю и зарисовать получившуюся картину трещин;
6. Продолжить нагружение образца до появления новых трещин, зарисовать картину трещин и зафиксировать нагрузку;
7. Сделать заключение о характере напряженного состояния в образце;
8. Используя результаты работы 1, сделать количественную оценку напряжений в образце при двух уровнях нагружения.

Модуль упругости материала образца  $E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$

#### Литература.

1. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
2. Экспериментальная механика: в 2-х книгах. Книга 2. – Пер. с англ./ Под ред. А.Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 552 с.
3. Пригоровский Н.И., Панских В.К. Метод хрупких тензочувствительных покрытий. – М.: Наука, 1978. – 184 с.

Лицензия ПД-11-0002 от 15.12.99

---

Подписано в печать 06.05.2002. Тираж 30 экз. Усл. печ. л. 1,0.  
Формат 60X90/16. Набор компьютерный. Заказ № 112/2002.

---

Отпечатано на ризографе  
в отделе Электронных издательских систем ОЦНИТ  
Пермского государственного технического университета  
614600, г. Пермь, Комсомольский пр., 29а, к.113, т.(3422) 198-033