УДК 622.831.3

Гуменный Антон Сергеевич, канд. техн. наук, доцент (КузГТУ, г. Кемерово)
Янина Татьяна Ивановна, канд. техн. наук, доцент (КузГТУ, г. Кемерово)
Anton Sergeevich Gumennyy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (KuzSTU, Kemerovo)
Tatyana Ivanovna Yanina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (KuzSTU, Kemerovo)

СПЛОШНЫЕ ФОТОУПРУГИЕ ДАТЧИКИ В СИСТЕМАХ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
SOLID PHOTOELASTIC SENSORS FOR CONTINUOUS MONITORING OF ROCK STRESS

Аннотация. Обобщены результаты исследований сплошных фотоупругих датчиков. Рассмотрены устройство контроля, передача интерференционной картины по световоду и программа определения радиусов колец. Приведены данные лабораторных испытаний.

Abstract. Research on solid photoelastic sensors is reviewed. The monitoring device, fiber optic transmission of the interference pattern, and software for measuring ring radii are described. Laboratory test results are presented.

Введение

В краевых частях массива и охранных целиках нагрузка меняется по мере ведения горных работ. Для оценки состояния этих участков требуются повторные измерения, по которым можно проследить накопление напряжений. При скважинном контроле такую информацию получают от датчика, закрепленного в выбранной точке. Среди исследованных средств измерения имеются фотоупругие датчики, показания которых регистрируются оптически [1, 2].

В работах [2, 4] рассмотрен сплошной стеклянный датчик, у которого нагрузка связана с радиусами наблюдаемых интерференционных колец. Для непрерывной регистрации предложено передавать изображение из скважины по световоду и измерять радиусы программно [2, 3]. Настоящий обзор объединяет эти результаты. Основное внимание уделено тому, как свойства датчика, передача изображения и его обработка влияют на получение количественного показания.

Принцип измерения и взаимодействие датчика с породой

Оптические свойства стекла зависят от его напряженного состояния. В расчетах фотоупругих датчиков используется закон Вертгейма [1, 2]. Для однородного участка материала при однократном прохождении света этот закон записывается в виде

$$\Delta = C\, d\, (\sigma_1 - \sigma_2)$$

где Δ — оптическая разность хода, C — оптическая постоянная материала по напряжениям, d — длина пути света в материале, σ_1 и σ_2 — главные напряжения в рассматриваемой плоскости. Для отражательной схемы в расчет входит полный путь света в датчике. Нагрузку, действующую со стороны породы, определяют с учетом механического взаимодействия датчика со стенками скважины [1, 2].

Клеевое закрепление обеспечивает передачу нагрузки от стенок скважины к стеклянному датчику [2]. При изменении напряженного состояния изменяется показатель преломления материала датчика, а следовательно, и радиус интерференционных колец. Полученная в работе [2] аналитическая зависимость позволяет определять равномерно распределенную нагрузку по радиусу кольца заданного порядка. Внешний вид датчика и интерференционная картина приведены на рис. 1.

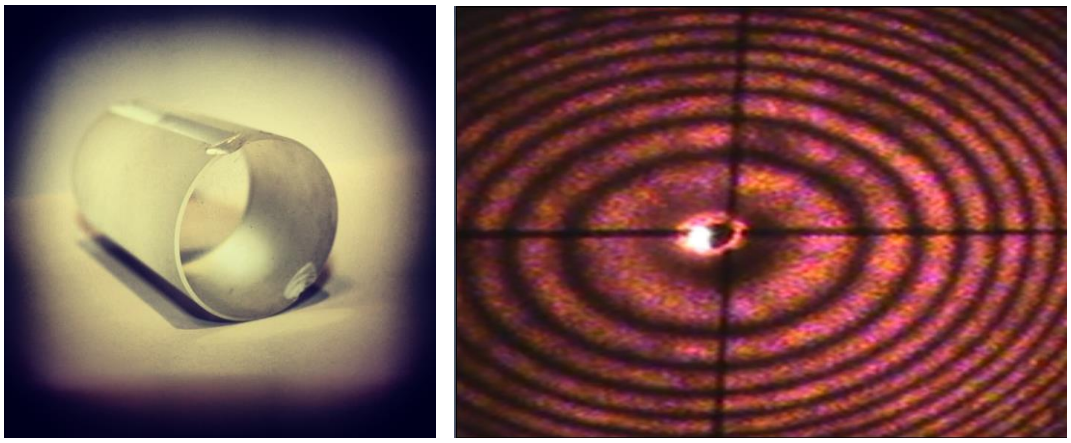

Рис. 1. Датчик (слева) и интерференционная картина (справа)

В рассмотренных опытах использовался цилиндр из стекла К8 с поперечным размером 40 мм и длиной 60 мм. На заднем торце выполнено отражающее покрытие. Измерение характеризует квазиглавные напряжения, приложенные поперек оси цилиндра [2]. Поэтому направление скважины задает плоскость, к которой относится результат контроля.

При расчете нагрузки существенны модули упругости породы и стекла. Исследование их соотношения [2] показало, что чувствительность результата к ошибке определения модуля породы возрастает при сближении этих величин. Для более податливой породы влияние такой ошибки

меньше. Это следует учитывать при переносе лабораторной зависимости на объект с другими упругими свойствами.

Оптический канал непрерывного наблюдения

В устройстве [3] источник света и аппаратура регистрации вынесены в наземную часть, а в скважине находятся датчик и сопрягающие оптические элементы. Связь с ними осуществляется по волоконно-оптическим кабелям. Для освещения в схеме принят гелий-неоновый лазер с длиной волны 632 нм [2]. На рис. 2 показано прохождение сигнала от источника до программы обработки.

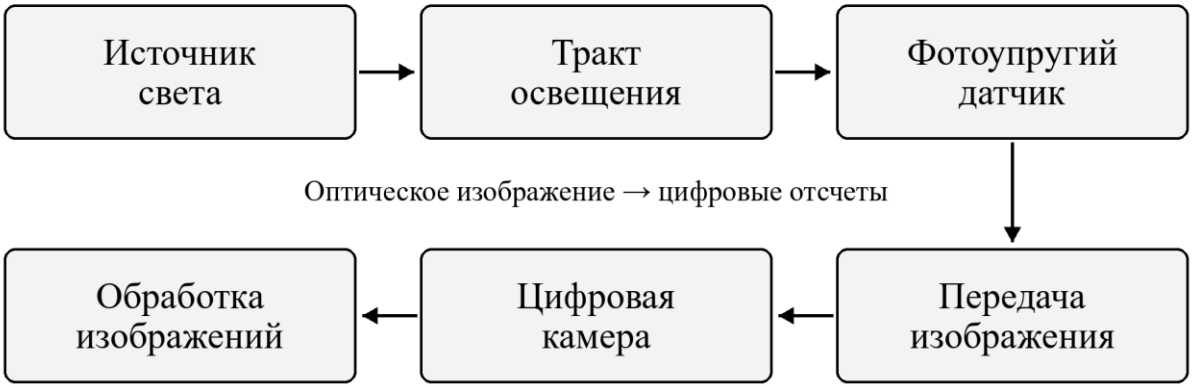

Рис. 2. Схема измерительного канала. Составлено по [2, 3]

Осветительный тракт подводит излучение к датчику. Интерференционная картина возникает в отраженном свете и через приемную линзу направляется в световод, передающий изображение на камеру. Радиус кольца определяется уже по кадрам, поступившим в компьютер [2, 3]. В таком построении измерительного канала сохранение различимости границ колец необходимо для последующего расчета нагрузки.

При исследовании передачи изображения через световод [2] использовали тестовую миру с темными и светлыми полосами. Светофильтры позволяли повторять наблюдения на разных длинах волн. Контраст оценивали по крайним значениям освещенности на полученных изображениях. Лучшие условия передачи выявлены в длинноволновой области видимого диапазона, чем и обоснован выбор гелий-неонового источника для схемы устройства. Этот опыт относится к оптическому каналу и дополняет испытания самого датчика под нагрузкой.

Обработка интерференционной картины

Для работы с изображениями в исследовании [2] использованы средства NI Vision Builder 3.6.1 и NI Vision Assistant 3.6.1. Входные кадры поступают от камеры с USB-интерфейсом. Предусмотрен также вариант подключения аналоговой камеры через видеозахват. В обоих случаях дальнейшие вычисления выполняются над цифровым изображением.

Вначале кадр фильтруют и переводят в бинарную форму. Масштаб устанавливают по двум отмеченным точкам с известным расстоянием между ними. Сопоставление этого расстояния с числом пикселей позволяет выражать найденные радиусы в миллиметрах. При прежнем положении оптики сохраняется одна калибровка. После изменения установки камеры или ориентации картины масштаб определяют заново [2].

Для подсчета колец анализируют чередование светлых и темных участков вдоль луча из центра картины. Далее на кадре распознаются окружности и определяются их размеры. Начальное число колец запоминается, поскольку при нагружении появляются новые кольца. Их появление учитывается при сопоставлении кадров, чтобы измерения относились к выбранному ранее кольцу [2].

По радиусу выбранного кольца вычисляется значение распределенной нагрузки в соответствии с аналитической зависимостью [2]. Результаты последовательных измерений выводятся на экран компьютера в виде графика изменения нагрузки во времени.

Лабораторные исследования

Сопоставление методов проводилось на песчано-цементном кубе со стороной 300 мм [2, 4]. В образце были подготовлены скважины, в одну из которых эпоксидным клеем закрепляли стеклянный датчик. Испытательная установка с гидравлическим прессом развивала усилие до 500 кН. Использованный первоначально КСИМ-40 с пределом 40 кН оказался недостаточен для этих опытов. Фотография установки приведена на рис. 3.



Рис. 3. Лабораторные испытания модельного образца под прессом

В этом опыте оптическое измерение выполнялось при освещении лазером на длине волны 532 нм. Радиус центрального кольца отсчитывался по картине на экране. При тех же ступенях нагружения регистрировали электрические параметры образца и амплитуду прошедших ультразвуковых колебаний. Полученные зависимости позволяли сопоставить реакцию разных измерительных каналов на нагрузку, приложенную к одному образцу [2, 4].

Электрические измерения включали потенциал естественного стационарного поля и удельное сопротивление. Потенциал регистрировали доработанным прибором МК-3 относительно заземления. Ультразвуковой канал состоял из пьезоэлементов, генератора и осциллографа. Пневматический прижим обеспечивал контакт излучателя и приемника со стенками скважин [2].

В результате эксперимента установлено, что изменение радиуса интерференционных колец при увеличении нагрузки на модельный образец хорошо согласуется с другими параметрами геофизического контроля — потенциалом естественного стационарного электрического поля, амплитудой ультразвуковых колебаний и удельным электрическим сопротивлением [2, 4]. Это подтверждает возможность определять изменение нагрузки на образец по изменению радиуса интерференционных колец.

Для оценки информативности метода использовались ошибка метода, коэффициент информативности и количество получаемой информации о напряжениях. Для каждой нагрузки производилось несколько измерений радиуса кольца и потенциала естественного поля [2]. По уточненным данным относительная ошибка измерения нагрузки интерференционным методом не превышает 20 %. Эта оценка относится к условиям выполненных лабораторных исследований.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают, что по изменению радиуса интерференционного кольца сплошного фотоупругого датчика можно определять изменение нагрузки в месте его установки. Сопоставительный эксперимент на модельном образце показал согласованность оптических измерений с ультразвуковым и электромагнитными методами [2, 4].

Разработанное устройство [3] позволяет передавать интерференционную картину по волоконно-оптическому кабелю на дневную поверхность и обрабатывать ее в автоматическом режиме. Программа выполняет калибровку изображения, выделяет кольца и определяет их радиусы. При расчете нагрузки необходимо учитывать упругие характеристики породы, в которой установлен датчик [2].

Список литературы

1. Кулаков Г. И. Фотоупругие датчики для геомеханических измерений (теоретические основы). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 151 с.

2. Гуменный А. С. Совершенствование метода непрерывного контроля напряженного состояния массива горных пород на основе сплошных фотоупругих датчиков : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.20. Кемерово, 2013. 143 с.

3. Гуменный А. С., Дырдин В. В., Янина Т. И. Устройство непрерывного контроля напряженного состояния массива горных пород: пат. 2421615 Рос. Федерация. № 2010105501/03; заявл. 15.02.2010; опубл. 20.06.2011.

4. Гуменный А. С. Оценка напряженного состояния образца горной породы сплошным фотоупругим датчиком, звуковым и электромагнитными методами в лабораторных условиях // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 4 (98). С. 3–6.