

методов испытания гидроизоляции, их дополнения многократными испытаниями на гибкость при низких температурах.

Разработка новых методов испытаний и повышение требований к гидроизоляционным материалам по устойчивости их к циклическим воздействиям при низких температурах позволят правильно подбирать существующие гидроизоляционные материалы для мостовых сооружений с учетом категории дороги. Это явится стимулом для разработки новых гидроизоляционных материалов, обеспечивающих долговечность мостовых сооружений под воздействием часто обращающихся большегрузных транспортных средств.

Литература

1. Пособие П2-2000 к СНиП 3.06.07-86. – Минск : РУП «БелдорНИИ», 2000. – С. 124–177.

2. Переселенцев, Г.С. Динамика и ресурс малых автодорожных мостов / Г.С. Переселенцев, А.Н. Звягинцев, Е.И. Павлов, И.К. Матвеев // Транспортное строительство. – 2001. – № 11. С. 17–21.

УДК 621.384.3

МОНИТОРИНГ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ МЕТРОПОЛИТЕНА НА ОСНОВЕ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ

Мойсейчик Е.А.¹, канд. техн. наук, доцент,

Мойсейчик Е.К.², канд. техн. наук, доцент,

Филатов С.А.³, канд. техн. наук

^{1,2}*Белорусский национальный технический университет,*

³*ИТМО НАН Беларуси*

(г. Минск, Республика Беларусь)

Введение

В железобетонных тоннелях метро основная часть дефектов связана с недостаточным качеством устройства обделки и гидроизоляции [1, 2]. Если первая группа дефектов может привести к нарушению целостности обделки, образованию в ней полостей, выпадению отдельных кусков обделки, то вторая вызывает изменение свойств железобетона, ведет к водопритоку в тоннели и затрудняет их нормальную эксплуатацию. Отказы гидроизоляции на ранней стадии

эксплуатации объекта способствуют преждевременному износу железобетонных конструкций обделок [2]. Основными причинами попадания неорганизованной воды в тоннели являются [3]: несоблюдение технологических требований при ведении работ (около 60 % от общего количества протечек); низкое качество используемых гидроизоляционных материалов; ошибки при проектировании и планировании. По данным специалистов [3] различные нарушения технологии производства работ при строительстве тоннелей метро распространены практически на всех метрополитенах стран СНГ. Это приводит к тому, что уже после ввода в эксплуатацию сооружений эксплуатирующие службы сталкиваются с проблемами, создаваемыми неорганизованными водопитоками (протечками) в тоннели. Так, «в 2005 г. для обеспечения нормальной эксплуатации из всех метрополитенов СНГ было откачено более 50 млн. м³ воды. Наибольший объем приходится на Московский метрополитен (более 20 млн. м³), а также Ташкентский, Казанский и некоторые другие» [3].

В процессе эксплуатации метрополитена дефектные участки обделки кроме воздействия воды испытывают давление окружающих пород и знакопеременные динамические нагрузки от движения и торможения поездов. Железобетонная обделка подвергается действию сжимающих, растягивающих и изгибающих (на криволинейных участках) напряжений. Эти напряжения при сочетании неблагоприятных факторов (выход из строя прорезиненных прокладок, пересечения активных геодинамических зон) могут привести к ускоренному нарушению гидроизоляции и обделки в целом [2].

Наличие указанных и других дефектов и недопустимость снижения несущей способности и эксплуатационных характеристик обделок до уровня, при котором существует опасность для пребывания людей, движения поездов и сохранности оборудования и устройств метрополитенов, требуют «постоянного и тщательного мониторинга всех подземных сооружений на всех метрополитенах России и СНГ» [3].

Среди различных систем мониторинга обделки тоннелей метрополитенов, направленных на обеспечение ее работоспособности на стадиях строительства, эксплуатации, ремонта, реконструкции, технического диагностирования (освидетельствования) элементов и сооружения в целом,

выделяется направление, базирующееся на термографическом сканировании обделки в инфракрасном свете. Под мониторингом обделки (англ. monitoring от лат. monitor- предупреждающий) при этом подразумевается определенная система наблюдения, оценки и прогноза состояния обделки и развития в ней и примыкающей грунтовой среде различных дефектов и явлений, позволяющих идентифицировать их с помощью пассивных и активных методов теплового контроля.

Целью настоящей статьи является изложение особенностей применения термографии для выявления дефектов в обделке тоннелей.

1. Выявление неоднородностей в вещественной среде по температурному полю поверхности.

При отсутствии движения тела и его составляющих уравнение распространения тепла по объему представляется в виде [4]

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} - q_v - \operatorname{div}(\bar{\lambda} \operatorname{grad} T) = 0, \quad (1)$$

где q_v -интенсивность(плотность) внутренних источников тепла различной природы (химические реакции в теле, фазовые превращения и др.);

ρ - плотность материала;

$\bar{\lambda}$ -матрица теплопроводности для неоднородного тела;

c_p -удельная теплоемкость среды при постоянном давлении.

Для изотропного тела $\bar{\lambda} = \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$,

λ -коэффициент теплопроводности.

Распределение температуры для изотропного стержня без внутренних источников вытекает из уравнения

$$\frac{\delta T}{\delta t} - \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\delta^2 T}{dx^2} = 0, \quad (2)$$

где $\frac{\lambda}{\rho c_p}$ - коэффициент температуропроводности среды, представляющий собой меру скорости изменения температуры

единицы объема тела при прохождении через него теплового потока, пропорционального λ .

Аналитическое решение уравнения (2) имеет вид

$$T(x, t) = TL + \frac{4(T_0 - T_L)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \sin\left(\frac{2n+1}{L} \pi x\right) \exp\left(-\frac{(2n+1)^2}{L^2} \pi^2 \frac{\lambda}{\rho c_p} t\right). \quad (3)$$

Выражения (1)–(3) показывают, что распределение температур должно соответствовать особенностям внутреннего строения неоднородного тела. Действительно, при его нагревании тепловая энергия будет передаваться на основе теплопроводности (в твердой части тела), конвекции (в жидкой фазе) и излучения (в пустотах). Различие теплопроводности между составляющими (фазами) тела может в значительной степени влиять на распространение тепла, и, следовательно, на распределение объемной и поверхностной температуры объекта. Тепловое состояние неоднородного тела характеризуется совокупностью следующих параметров: размеры тела; теплопроводность; излучательная способность поверхности, форма и размеры дефектов; теплопроводность в месте дефекта. Распределение температуры в теле зависит от перечисленных параметров, а также от геометрии тела и временной диаграммы нагрева/охлаждения. Если в теле нет дефекта, то температурный градиент должен быть «плавным», но если имеется дефект, то он вызовет отклонение температурного градиента вследствие разности теплопроводности на смежных участках.

Благодаря термографическому изображению можно обнаружить дефекты (например, пустоты или трещины), потому, что их теплопроводность отличается (обычно в меньшую сторону) от теплопроводности окружающего их материала. Теплопроводность материала может локально меняться в тех областях, которые подвергались механическому или тепловому воздействию. Такие изменения зачастую являются более заметными, и поэтому их легче обнаружить, чем изменения в свойствах материалов. Тепловой поток наблюдается в веществах всякий раз, когда уровни температур на каких-то смежных участках отличаются. Тепловая энергия перемещается от участка с более высокой температурой к участку с более низкой температурой. Поток тепловой энергии будет в этом направлении до тех пор, пока уровни температур не станут одинаковыми. Увеличение разницы температур между двумя участками приводит

к увеличению скорости теплового потока. Тепловой градиент (температурный градиент) – это разница температур между двумя точками, которые разделены единицей расстояния. Температурный (тепловой) контраст, т.е. разница между температурами в различных точках объекта, определяет видимость подповерхностного дефекта. Тепловой контраст увеличивается с разницей между теплопроводностью дефекта и теплопроводностью основной массы материала тела. Посредством теплового сканирования воспроизводится изображение, которое соответствует распределению температурных полей по поверхности объекта. Способ передачи тепла через объект зависит от свойств такого объекта. Так, дефект, который будет препятствовать движению силового потока через элемент, будет также сдерживать поток тепла через этот элемент. Соответствующее распределение температуры можно использовать для локализации дефекта, так как поток тепла изменяется в окрестности дефекта из-за неодинаковой теплопроводности. Это явление способствует созданию высокого теплового контраста в объекте и выявляет причину нарушения в тепловом изображении.

Для обнаружения дефекта в теле часто достаточно наблюдать за установившимся распределением температуры на поверхности тела. В иных случаях тело можно нагреть или охладить, чтобы усилить внутренний теплообмен. Поэтому методы неразрушающего контроля тела с использованием инфракрасной термографии можно разделить на активные и пассивные. Активный ИК-термографический метод требует использования внешнего теплового источника для получения желаемого изображения. Во многих случаях тепловой импульс направляется на образцы, и поток тепла, перемещающийся через объект, контролируется. Дефект в объекте изменяет поток тепла и вызывает нарушение в изображении. Пассивный метод не требует использования дополнительного источника тепла для получения желаемого теплового изображения. При пассивном методе небольшое увеличение температуры, которое является неизменным признаком дефекта, отслеживается на тепловом изображении и, не дожидаясь катастрофических последствий, можно провести надлежащее техническое обслуживание.

2. Особенности технологии термографического сканирования обделки тоннеля

Технология мониторинга заключается в сборе с заданной периодичностью информации по температурному полю исследуемого участка обделки метрополитена, ее экспериментальному и расчетному анализу и подготовке предложений по обеспечению требуемой работоспособности, термографическому контролю за качеством ремонтно-восстановительных работ. Процесс мониторинга предполагает анализ инженерно-геологических особенностей грунтовой среды, проектной документации тоннеля на участке; определение количественных значений температуры в точках поверхности обделки и дополнительных теплотехнических характеристик обделки и грунтовой среды; качественный и количественный анализ температурных полей на исследуемой поверхности; выявление зон с аномальной температурой, обусловленной наличием дефектов в контролируемой обделке, примыкающей грунтовой среде; численном моделировании теплотехнических параметров обделки и сопоставление их с данными термографирования; идентификацию дефектов. Тепловой инструментальный контроль выполняют в соответствии с технологическими картами или технологическими инструкциями, разрабатываемыми на основе действующих технических нормативно-правовых актов и содержащих технологию сканирования. Тепловой контроль совмещают с фиксацией состояния обделки и ее дефектов в видимом диапазоне, дистанционном контроле влажности конструкций обделки и, при необходимости, – с другими методами неразрушающего контроля. Взаимосвязь названных этапов и их последовательность показана на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема ИК-сканирования обделки тоннеля

Следует иметь в виду, что к настоящему времени достаточно детально разработана технология сканирования надземных строительных и иных объектов [5–7], особенности которой зафиксированы в нормативных документах [8]. Для подземных сооружений подобные документы отсутствуют, что определяется прежде всего многофакторностью решаемых задач. В силу этого на основании предварительного изучения технической документации по конкретному объекту(тоннелю) приходится разрабатывать технологию производства работ по ИК-сканированию.

Существенными ограничениями при этом является необходимость производства работ в сжатые сроки из-за постоянно изменяющейся в тоннеле температуры, что требует увязки технических параметров сканирующей аппаратуры со скоростью (v) ее продвижения вдоль тоннеля. На рис. 2 приведены две возможные схемы сканирования обделки тоннеля. Первая схема (рис. 2а) позволяет получить полную развертку термоизображения поверхности тоннеля. Вторая схема дает набор термоизображений в форме полос 1 (рис. 2б) на развертке поверхности тоннеля. Вторая схема дает меньше информации по температурному полю поверхности тоннеля, но в этом случае можно использовать термографическую аппаратуру с охлаждением приемника жидким азотом. Предварительно скорость движения термографической установки вдоль тоннеля можно определить по зависимости

$$v = \frac{k b}{T}, \quad (4)$$

где b – размер пятна поверхности, сканируемого за один кадр;

$k=0,8 - 0,9$ – коэффициент, учитывающий перекрытие кадров;

T – для схемы рис. 2а время сканирования полосы поверхности тоннеля длиной $2\pi d$ (d – диаметр тоннеля); для схемы рис. 2б время формирования кадра.

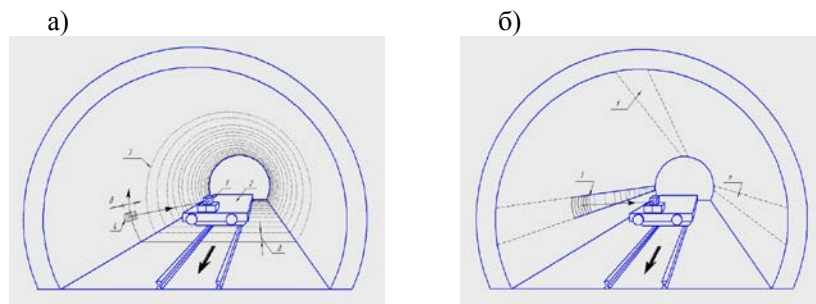


Рис.2. Возможные схемы сканирования тоннеля

Окончательно скорость (v) назначается в процессе сканирования. При этом оптимальной будет скорость, при которой разрешение

записи в направлении движения столь же высоко, как и в обратном. При повышении скорости происходит потеря детальности; понижение же не дает выигрыша в информации. Это существенно для получения качественного изображения конкретных дефектов. Опыт показывает, что при использовании термографов с частотой вращения зеркала 30 – 300 Гц наиболее приемлемое качество термоизображений можно получить при скорости движения в пределах $v=0,5-7$ км/час. Во время съемки изменение температурного напора не должно превышать 30 % от начального значения. Поверхности объекта в период тепловизионных измерений не должны подвергаться дополнительному тепловому воздействию от биологических объектов, источников освещения. Минимально допустимое приближение оператора тепловизора к обследуемой поверхности должно составлять не менее 1 м, электрических ламп накаливания – 2 м. Идентификацию объектов на термограмме можно проводить путем сравнения термоизображений с видимыми изображением той же зоны поверхности, полученной с помощью съемки в видимом свете. Тепловизионную съемку в тоннеле метрополитена желательно проводить спустя 2-3 часа после прекращения движения поездов, в преддверные или ночные часы, когда тепловое влияние окружающей среды минимально.

Качество термоизображения зависит от расстояния (L) приемника до исследуемой поверхности. С увеличением расстояния L возрастает поле обзора, ухудшается детальность изображения и искажаются значения истинной температуры за счет поглощения в атмосфере тоннеля. Последний эффект можно не учитывать при расстояниях менее 30 м. При больших расстояниях следует применять соответствующие поправочные формулы, учитывающие поглощение ИК-излучения.

Расстояние (L , в метрах) установки тепловизора от поверхности объекта можно определить по формуле

$$L \leq \frac{\Delta H N_c}{10\varphi}, \quad (5)$$

где φ – угловой вертикальный размер поля обзора тепловизора, рад;

ΔH – линейный размер подлежащего выявлению участка ограждающей конструкции с нарушенными теплозащитными свойствами, принимаемый при контроле поверхности отделки от 0,01 до 0,2 м.

N_c – число строк развертки в кадре тепловизора.

Расположение термографа желательно назначать так, чтобы поверхность объекта измерений находилась в прямой видимости.

При анализе термограмм дефектов решающими факторами являются сведения о тепловом режиме тоннеля, опыт оператора и вид изображения соседних зон, на фоне которых обнаруживается конкретная аномалия. Целесообразно при этом использовать следующие вытекающие из опыта рекомендации:

- использовать компьютерное совмещение видимого и теплового изображения одного и того же участка поверхности, или оконтуривание дефектных зон на видимом изображении после их обнаружения на термограммах;

- для анализа тепловых аномалий использовать эталонные изображения дефектов, которые должны находится в тех же условиях теплообмена, что и исследуемый участок;

- необходимо учитывать, что поверхности, визируемые под большим углом, выглядят на изображении более холодными, аналогичный эффект проявляется и относительно снятых под большим углом удаленных зон, при больших расстояниях съемки;

- неокрашенные металлические элементы при отсутствии внешней подсветки выглядят на термоизображении, как правило, более холодными, чем они есть на самом деле;

- роль тепловых аномалий могут играть архитектурные детали, выступы; неоднородностям коэффициента излучения поверхности; неоднородностям теплообмена с окружающей средой; различного рода дефекты.

Для количественной оценки тепловых аномалий поверхности отделки приходится использовать численное моделирование теплового состояния тоннеля с учетом фактических тепловых характеристик материалов отделки, свойств грунтов, особенностей инженерно-геологических характеристик оснований. Количественную оценку тепловых аномалий можно производить при необходимости оценить степень опасности дефектов для нормального функционирования тоннеля.

Заключение

Из изложенного следует, что мониторинг обделки тоннеля метрополитена на основе термографического сканирования обладает высокой чувствительностью, наглядностью и объективностью результатов, позволяет с высокой производительностью в бесконтактном режиме определять локализацию и идентификацию дефектов, отслеживать их развитие с помощью пассивных и активных методов теплового контроля.

Литература

1. Иванов, В.Ф. Проблемы проектирования и эксплуатации тоннелей метрополитенов / В.Ф.Иванов // Метро и тоннели. – 2002. – № 2. – С. 42–43.
2. Гидроизоляция заглубленных и подземных сооружений при строительстве и ремонте: учебное пособие / А.А. Шилин [и др.]. – Тверь: Изд-во «Русская торговая марка», 2003. – 400 с.
3. Устюжский, А. AquaStop-2006: гидроизоляция метрополитенов – в центре внимания /А. Устюжский // Петербургский строительный рынок. – № 5 (90).
4. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. - М.-Л.: Машгиз, 1962. – 456 с.
5. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер.с франц. / Ж. Госсорг . – М.: Мир, 1988. – 416 с.
6. Дроздов, В.А. Термография в строительстве / В.А. Дроздов, В.И. Сухарев. – М. : Стройиздат, 1987. – 238 с.
7. Вавилов, В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля/ В.П. Вавилов. – М. : Машиностроение, 1991. – 240 с.
8. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций: ГОСТ 26629-85.